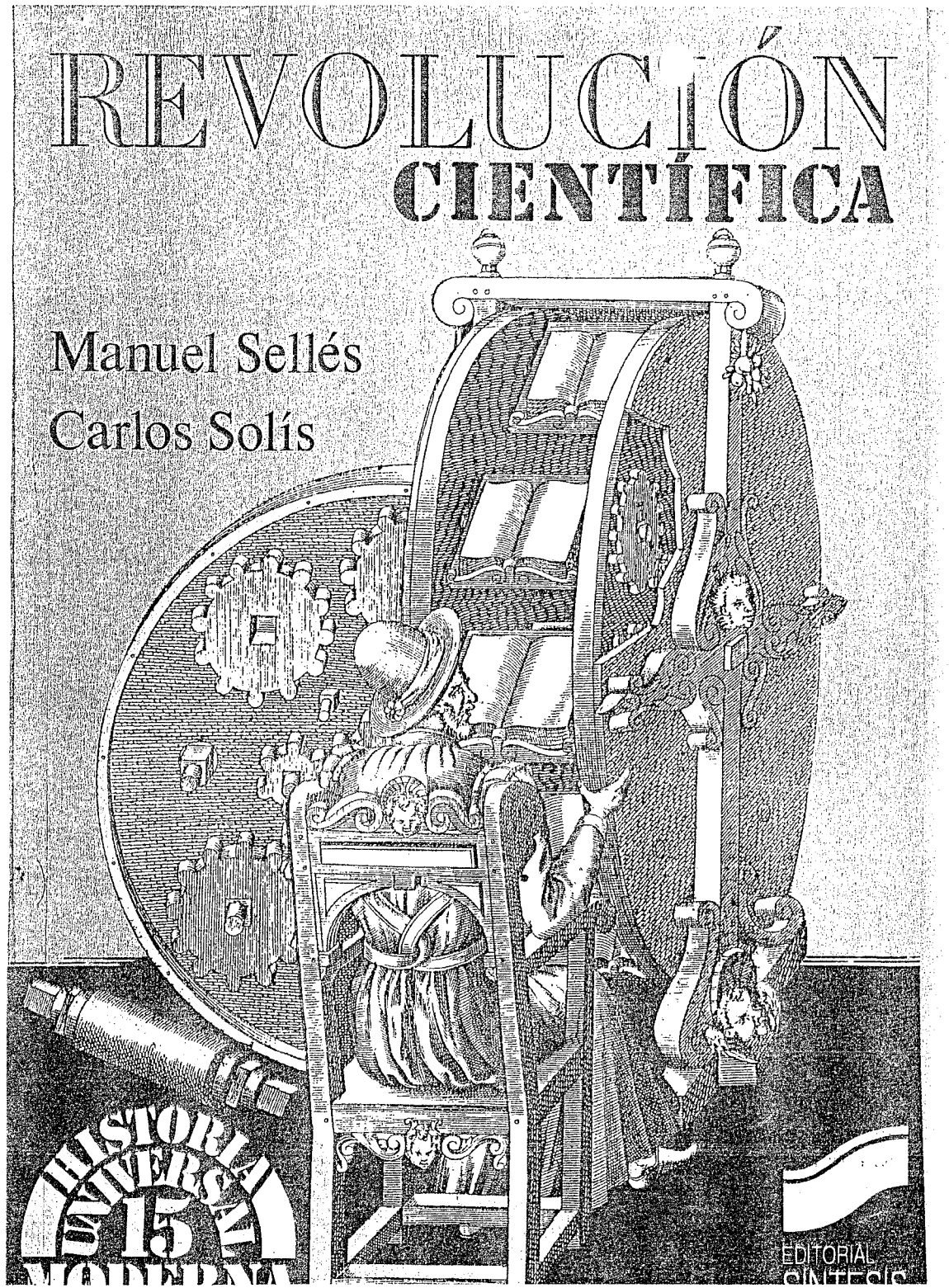

4. La revolución copernicana

4.1. El universo de los aristotélicos

Los sistemas de esferas desarrollados por Eudoxo y Calipo para dar cuenta de los fenómenos celestes eran entidades matemáticas separadas. Aristóteles las transformó en un sistema físico integrado. Convirtió a las construcciones de los astrónomos en esferas cristalinas reales y conectó físicamente entre sí a los distintos conjuntos de esferas que se habían introducido independientemente para cada planeta. Para conseguirlo debía evitar que el movimiento de las esferas de un planeta se transmitiese, perturbándolas, a las esferas del planeta inmediatamente inferior. Y esto lo consiguió introduciendo entre ellas otras nuevas, dotadas de giros opuestos en una medida tal que las neutralizasen. Las 34 esferas de Calipo se convirtieron así en 55.

Los perfeccionamientos matemáticos de la astronomía ptolemaica, reclamados por la exactitud de las observaciones babilónicas y por la necesidad de dar cuenta de las variaciones en la distancia de los planetas a la Tierra, se avinieron mal con la cosmología física de Aristóteles. No resultaba fácil aceptar la realidad de los epiciclos y las excéntricas. El mismo Ptolomeo, en sus *Hipótesis* de los planetas, trató de reconciliar los formalismos matemáticos con la verosimilitud física. La obra fue desconocida en Occidente, pero parte de su contenido fue recogido en un tratado astronómico de Alhazén, traducido al latín con el título de *Liber de mundo et coelo*. Gracias a ello podía alcanzarse un cierto compromiso, mediante el expediente ptolemaico de encerrar en el estrato u orbe comprendido entre dos

esferas concéntricas límites (superior e inferior), con centro en la Tierra, todo el mecanismo diseñado para cada planeta. En tal orbe —no entraremos en detalles— se situaban las excéntricas y epiciclos que, ahora sí, ya se podían materializar como esferas cristalinas.

De todos modos, se consideraba que este compromiso no iba más allá de salvar las apariencias. Y, por otra parte, los filósofos naturales de la Edad Media no estaban familiarizados con las complejas técnicas de la astronomía, dominadas sólo por unos pocos matemáticos. Así que el problema quedó en suspenso. Las principales discusiones sobre cosmología atañían a temas tales como la eternidad del mundo, la procedencia del movimiento de los orbes celestes (la naturaleza del primum mobile), y la posible existencia del vacío o de lugares más allá de la esfera de las estrellas fijas, todos ellos impregnados de un fuerte matiz teológico.

La aparición del *De Revolutionibus,* como ya se ha apuntado en el Capítulo anterior, no modificó demasiado la situación. Conceder a la Tierra un movimiento real era algo que iba, no sólo contra el sentido común, sino contra todo el sistema de la física aristotélica. La obra de Copérnico, pues, comenzó a aceptarse como una herramienta de cálculo, no como una cosmología. Sin embargo, había quienes deseaban salvar la brecha entre los modelos matemáticos y la realidad física, y éstos no pudieron dejar de encontrar en Copérnico un sistema integrado del cosmos que explicaba algunas cuestiones muy relevantes, tales como la distinción entre planetas superiores e inferiores, la variación de su distancia a la Tierra, o las siempre sorprendentes retrogradaciones. Entre ellos se encontraba Tycho Brahe, un gran artífice de la revolución copernicana (por más que nunca dejase de ser geocentrista) que culminaría con Kepler y Galileo.

4.2. Un observador excepcional

La astronomía es una de esas disciplinas, bien trilladas desde la Antigüedad, en la que no es necesario acumular hecho tras hecho para ver qué sucede. En el Renacimiento, los movimientos celestes estaban ya bien establecidos, y toda la tarea a realizar consistía en algunas observaciones necesarias pero ocasionales para la elaboración de pronósticos y almanaques. La misma teoría de Copérnico vino a cambiar el marco matemático conceptual con que se interpretaban esos datos, pero en este sentido añadió poco de nuevo.

Las efemérides al uso, sin embargo, estaban lejos de responder puntualmente a los fenómenos celestes. No era en absoluto raro que errasen en la predicción de determinados acontecimientos. La conjunción de Júpiter y Saturno de 1563 estaba errada por un mes en las *Tablas alfonsíes* (lo que, dado que databan del siglo XIII, no era demasiado raro) y aún de varios días (lo que ya era más grave) en las *Tablas pruténicas,* compuestas pocos años

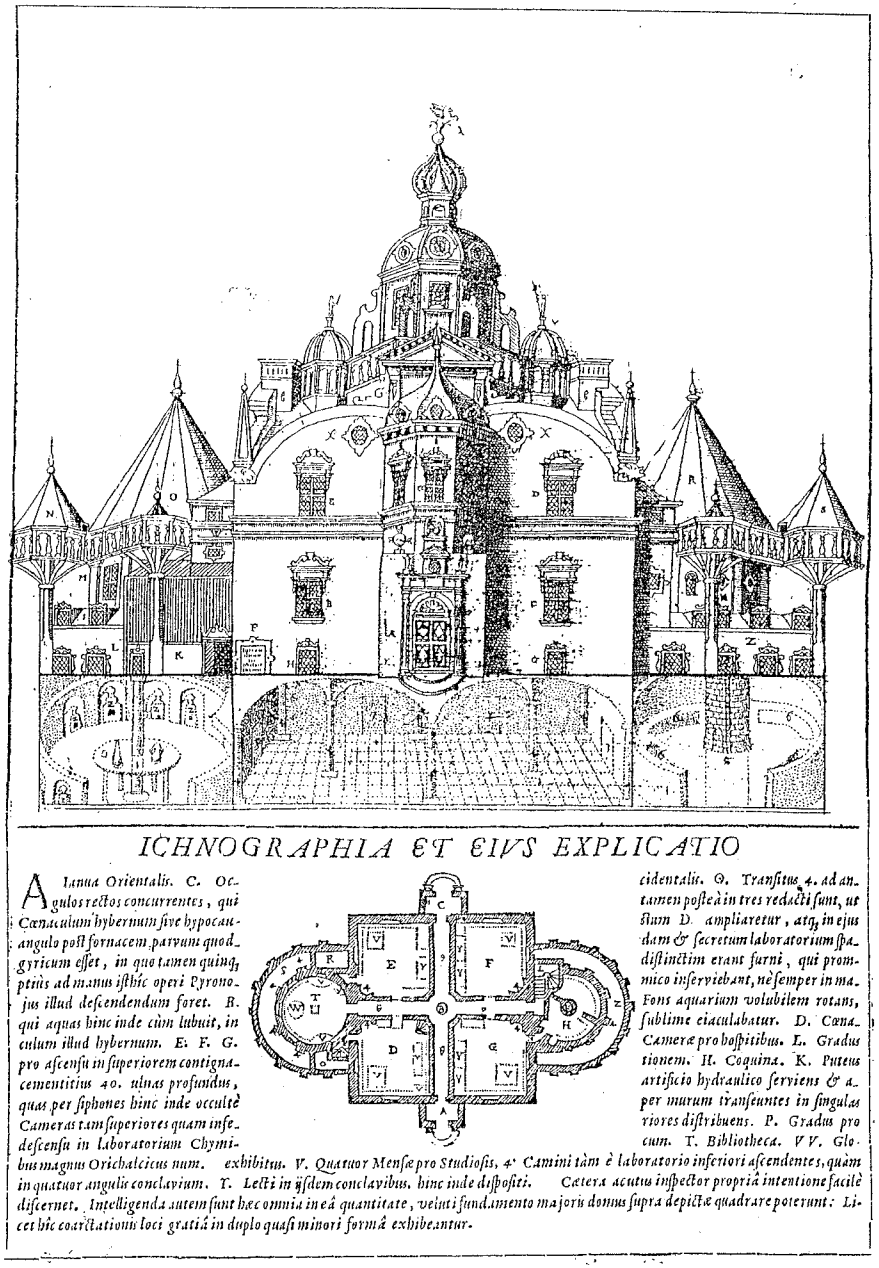

Figura 4.1. Observatorio de Tycho en la isla de Hven. De Tycho Brahe, *Astronomiae instauratae mechanica* (1598).

antes. En tal situación, no faltaron quienes se propusiesen mejorar el conjunto de observaciones disponibles. Pero esto no era sencillo. Se precisaba tanto de instrumentos difíciles de construir (y por lo tanto muy caros) como de la facilidad de poder dedicarse a la observación astronómica durante largos y continuados períodos de tiempo. En la segunda mitad del siglo XVI, abordaron esta tarea el Landgrave de Hesse, en su observatorio de Cassel y, de forma mucho más relevante, Tycho Brahe, en su observatorio de Uraniborg, en la isla de Hven.

Tycho se encontraba en una posición social y económica excepcional que le permitió instalar, no ya un observatorio, sino lo que hoy se considera como un verdadero centro de investigación. Contaba con edificios especialmente construidos, asistentes, e incluso recursos para fabricar papel y una imprenta para dar salida a sus publicaciones. A estos recursos, por su parte, se unía un especial genio para el diseño y manejo de instrumentos astronómicos. Sin entrar en más detalles, baste con decir que, si la precisión en el acervo de observaciones disponibles, con raras excepciones, rondaba los 10 o aún los 15 minutos de arco, Tycho fue capaz de alcanzar el minuto.

Junto a este esfuerzo por llevar las observaciones realizadas a simple vista a su máximo grado de precisión, Tycho destaca por sus actividades cosmológicas. Estas arrancan de fines de 1572. En este momento acaeció en los cielos un suceso espectacular y entonces sin precedentes conocidos: la aparición en la constelación de Casiopea de una nueva estrella (hoy clasificada como supernova), más brillante que cualquier otra del firmamento.

La cosmología aristotélica entonces aceptada establecía la total inmutabilidad de los orbes celestes: dentro de ese esquema, no podía tratarse de una estrella; tenía que tratarse de un fenómeno de índole meteorológica (así se clasificaban también los cometas) acaecido por debajo de la esfera de la Luna. Y, en tal caso, se debía poder medir su paralaje para obtener su distancia.

Esta determinación fue emprendida por diversos astrónomos, entre ellos Tycho. Aunque algunos que se dejaron llevar por sus preconcepciones y los errores de sus instrumentos manifestaron haber encontrado una paralaje importante, el resultado general fue que tal paralaje era indetectable: la nueva estrella se encontraba más allá de la Luna. De hecho, debía ser realmente una nueva estrella, puesto que tampoco pudo detectarse en ella ningún movimiento de tipo planetario. Tycho dejó esto bien sentado en su *De nova stella,* publicada al año siguiente. Así, comenzaron a surgir serias dudas sobre la veracidad de la cosmología aristotélica.

Cinco años más tarde de la aparición de la estrella, otro suceso astronómico vino a socavar todavía más profundamente la fe en la cosmología aristotélica: un nuevo cometa, de magnitud bastante espectacular. Como en el caso de la nova, se buscó su paralaje para determinar la distancia; lo que se halló es que, en todo caso, el cometa se hallaba en el mundo supralunar.

Algunos pensaron entonces que debían adscribirse a los cometas nuevas esferas cristalinas en los orbes celestes. Otros pusieron en tela de juicio la realidad de tales esferas. Tycho, en concreto, dejó de creer en su existencia al observar que el cometa debía haber atravesado en su movimiento las esferas

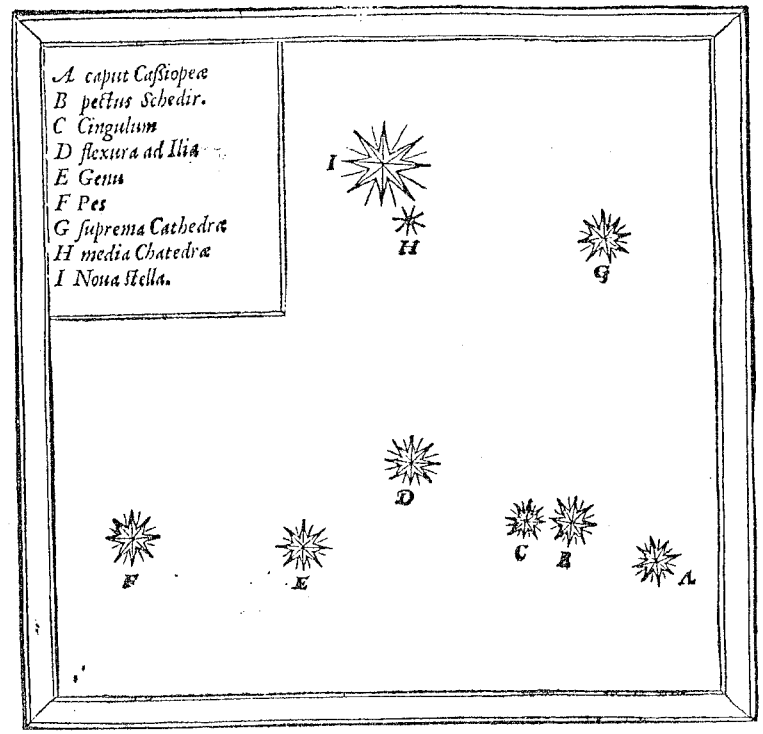

Figura 4.2. Estrellas de la constelación de Casiopea con la nova de 1572 de Tycho Brahe, *De stella nova* (1573).

de Venus y de Mercurio. Los cometas de 1580 y de 1585 no hicieron más que reforzar estas creencias.

Por entonces la astronomía ptolemaica se enfrentaba a la copernicana. Ambas no pasaban, sin embargo, de ser consideradas con un carácter meramente instrumental, pues nadie podía creer seriamente en el movimiento de la Tierra. En el plano cosmológico, la tradición aristotélica se tambaleaba. El momento era propicio para buscar un nuevo sistema que resolviese las dificultades. Y Tycho encontró un compromiso altamente satisfactorio, porque las eliminaba todas.

Su sistema era sencillo, y observacionalmente equivalente a los de Ptolomeo y Copérnico. Tycho seguía al primero dejando a la Tierra en reposo en el centro del universo; el movimiento diurno se atribuía, como siempre, a las

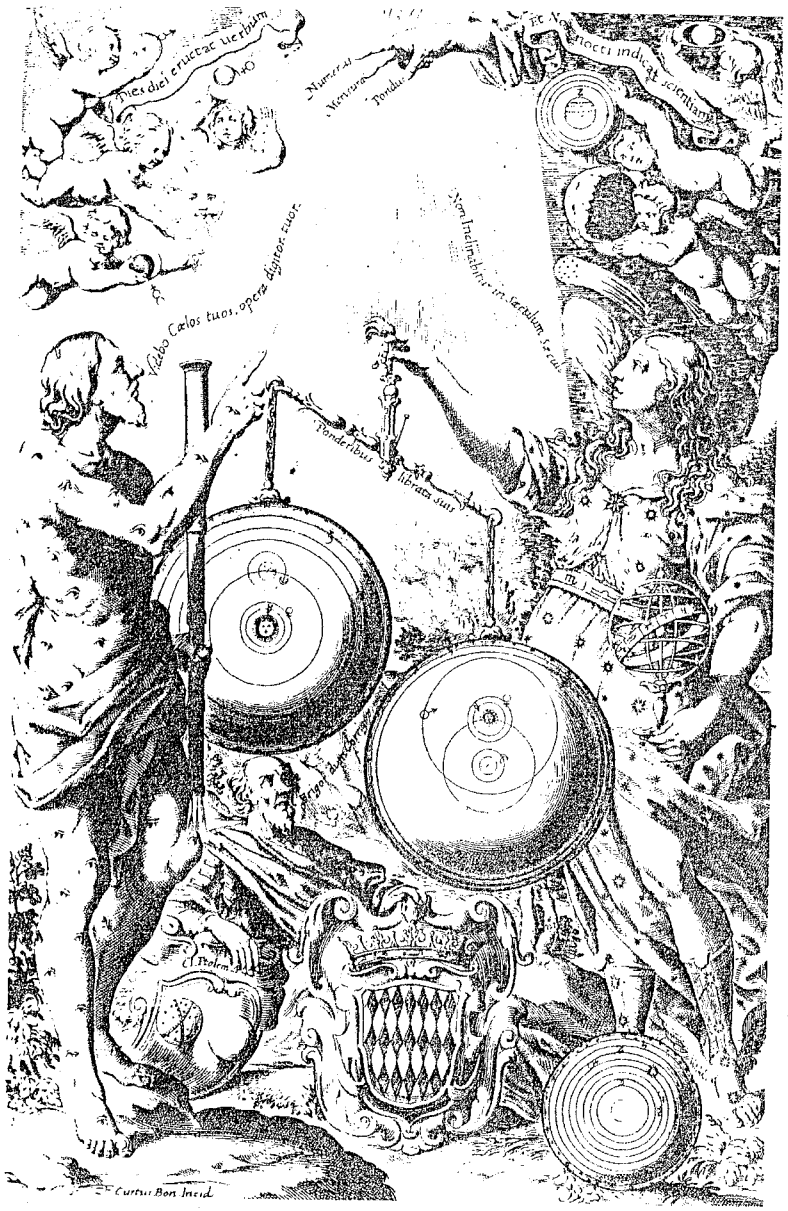

Figura 4.3. Frontispicio del *Almagestum novum* (1651) de Giovanni Battista Riccioli. En él se muestra a Urania pesando el sistema de Copérnico frente al de Riccioli, un sistema tychónico modificado en el que Mercurio, Venus y Marte giran en torno al Sol, y este, junto con la Luna, Júpiter y Saturno, giran en torno a la Tierra. Como es natural, la balanza se inclina por este último sistema. El de Ptolomeo, desechado, se halla a sus pies.

estrellas fijas. La Luna y el Sol giraban en torno a la Tierra. Y entonces adoptaba las ideas de Copérnico relativas a los planetas, haciéndolos girar en torno al Sol. De este modo se rechazaba la cosmología aristotélica, pero se conservaba el principio geostático. Y así el sistema podía dar respuestas instrumentales y constituir a la vez una imagen realista del cosmos. Esta propuesta se publicó en 1588, en una obra relativa al cometa del año anterior.

Si el sistema copernicano había tenido bien pocos seguidores, y aún no demasiado convencidos, el sistema geoheliocéntrico de Tycho alcanzó una gran resonancia. Más tarde se modificó dejando en reposo a las estrellas fijas y admitiendo el movimiento diurno de la Tierra, un sistema denominado semi-tychónico. En realidad, fueron éstos, más que el de Copérnico, los verdaderos sucesores del sistema de Ptolomeo.

4.3. Kepler, o la mística del cosmos

Entre los seguidores convencidos de Copérnico se encontraba Michael Mästlin, con quien se formara Johannes Kepler, el copernicano más ferviente cuya obra, como se apuntó en el Capítulo anterior, acabó con el copernicanismo. A él se debe, en realidad, el sistema que todavía hoy en muchos casos se atribuye erróneamente a Copérnico.

Kepler pensaba que la armonía y racionalidad del sistema copernicano reflejaba fielmente la constitución real del cosmos. Platónico convencido y ferviente cristiano, creía en un Dios geómetra que había configurado el universo como una suerte de símbolo de su propia naturaleza. La disposición del Sol, el espacio planetario y las estrellas (los elementos estáticos del sistema) era para él un símbolo de la Trinidad: el Padre, el Espíritu y el Hijo, respectivamente. De ahí su interés por desvelar la estructura geométrica del cosmos y el hecho de que, como se verá, el Sol asuma una posición muy especialmente privilegiada.

Con Kepler asistimos a la síntesis entre astronomía y cosmología, al nacimiento de la dinámica celeste. Por vez primera, las herramientas de las matemáticas no se ocupan de los planetas como meros puntos geométricos luminosos, sino como entidades plenamente materiales, de la misma naturaleza que la Tierra, sometidas a fuerzas físicas. El camino fue largo y dominado por el misticismo; este misticismo, sin embargo, nunca dejó de permanecer fiel a los datos de la observación. Pues se trataba de encontrar una hipótesis sobre el universo tan verdadera como esos mismos datos.

4.3.1. El misterio del universo

La propuesta copernicana mostraba por primera vez un sistema ordenado, en el que se podían calcular las dimensiones de los orbes planetarios.

Yendo más allá, Kepler se preguntó por el esquema geométrico subyacente a este orden, el por qué de la existencia de precisamente seis planetas, de sus determinadas distancias al centro, que los separan ampliamente entre sí, y de sus movimientos.

La respuesta la encontrará en la existencia de los cinco sólidos o poliedros regulares platónicos. En el plano pueden trazarse tantos polígonos regulares como se quiera; pero en el espacio el número de sólidos regulares, cuerpos simétricos cuyas caras son polígonos regulares que encajan perfectamente entre sí, sólo existen cinco, que se muestran en la figura 4.4. Cada uno de estos cuerpos admite una esfera inscrita, tangente al centro de todos y cada uno de los polígonos que los forman, y una esfera circunscrita, concéntrica con la anterior y tangente a sus vértices. Según la doctrina platónica, existía una estrecha correspondencia entre los cinco elementos y estos sólidos perfectos.

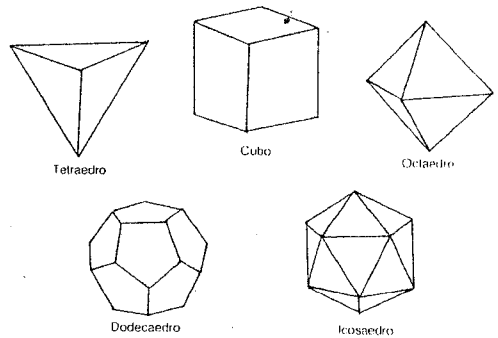

Figura 4.4. Los cinco sólidos regulares.

Planeta	Sólido regular	Valor Calculado	Valor de Copérnico
Saturno	Cubo	577	635
Júpiter	Tetraedro	333	333
Marte	Dodecaedro	795	757
Tierra	Icosaedro	795	794
Venus	Octaedro	707	723
Mercurio			

Tabla 1. Los valores que aparecen en la columna «valor calculado» son los radios de las esferas inscritas en cada uno de los sólidos regulares, adoptando el valor de 1000 para las correspondientes esferas circunscritas. En la columna de la derecha se recogen los correspondientes valores deducidos de la obra de Copérnico. En el caso del octaedro debería haberse calculado el valor de 577; pero aquí Kepler ha utilizado, no la esfera inscrita en el octaedro, sino la que toca a sus bordes.

Kepler piensa que estos cuerpos también pueden dar cuenta de las disposiciones celestes. La idea es encajarlos unos en otros. Se inscribe un cubo en la superficie esférica inferior del orbe de Saturno; entonces la esfera inscrita en dicho cubo coincide con la esfera superior del orbe de Júpiter, que a su vez es la esfera circunscrita de un tetreadro cuya esfera inscrita es la esfera superior del orbe de Marte. El orbe inferior de Marte es a su vez una esfera que circunscribe un dodecaedro, y su esfera inscrita es la esfera superior del orbe de la Tierra. La superficie inferior del orbe de la Tierra circunscribe a un icosaedro, cuya esfera inscrita es la esfera superior del orbe de Venus. Y la esfera inferior del orbe de Venus circunscribe a un octaedro cuya esfera inscrita es la esfera superior del orbe de Mercurio. En la figura 4.5. se muestra esta disposición.

La idea puede parecer hoy un tanto disparatada, pero, si se consulta la Tabla siguiente, en donde la distancia media de la Tierra al centro del sistema se toma como unidad, se verá que los valores predichos por este

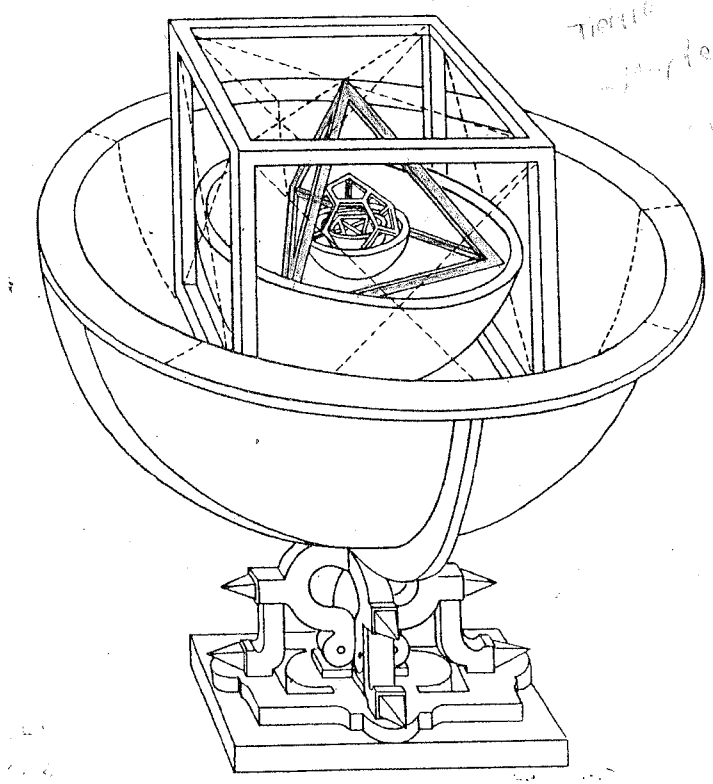

Figura 4.5. Disposición de los orbes celestes y los sólidos regulares: De Johannes Kepler, *Mysterium cosmographicum* (1596).

esquema para la distancia media de los orbes de los planetas así situados coincide más que notablemente con los valores de las distancias medias de los planetas al centro deducidos por Copérnico. Además, sólo existen cinco sólidos regulares, lo que explica por qué sólo pueden existir cinco espacios intermedios entre los orbes, y por consiguiente sólo seis planetas. Esta idea la mostrará en su *Misterium cosmographicum*, publicado en 1596 (y que alcanzará una segunda edición en 1621).

El acuerdo, sin embargo, no es perfecto, una circunstancia que se podía achacar a los datos de la observación. Tycho disponía, gracias a su labor, de mejores resultados para las excentricidades de los orbes planetarios de los que había podido utilizar Kepler. Este se convirtió en su ayudante y, a su muerte, en su sucesor. El esquema de Kepler le explicaba la razón del número de los planetas y del patrón de distancias. El trabajo que Tycho le encomendó, el de encajar en su sistema los recalcitrantes datos relativos a Marte, como veremos en seguida, le daría la razón de sus movimientos.

4.3.2. La guerra con Marte

Hasta Copérnico inclusive, toda la astronomía se había basado en dos principios que se consideraban indiscutibles: los únicos movimientos admisibles en los cielos debían ser circulares, y además estrictamente uniformes. De ahí que, como se vio en el Capítulo precedente, se multiplicaran las excéntricas y los epiciclos. Bien es verdad que la introducción del ecuante vulneraba la segunda condición, pues el movimiento resultaba uniforme respecto a este punto y no respecto al centro del círculo deferente; pero no dejaba de ser un artificio matemático sustituible (y así lo haría Copérnico) por un epiciclo apropiado.

En sus indagaciones sobre la órbita de Marte (lo que él llamó la guerra contra Marte), Kepler abandonó el principio de uniformidad de los movimientos, y se vio finalmente obligado a abandonar también el de circularidad. En este apartado trataremos de esbozar los puntos más destacados de este proceso.

Hasta Kepler, la astronomía había sido exclusivamente cinemática. No importaba la naturaleza de los puntos de luz que se veían en el firmamento: se trataba sólo de predecir sus movimientos. Kepler, sin embargo, otorgaba al Sol un especial protagonismo como fuente del movimiento cósmico. Por ello los planetas (incluída la Tierra) debían moverse más rápidamente cuanto más próximos estuviesen al Sol y, dentro de su órbita, más en el afelio que en el perihelio. Rechazaba así por razones de índole física la supuesta uniformidad de los movimientos planetarios.

Estas ideas le llevaron a modificar en dos puntos la teoría de Copérnico. En primer lugar, éste había situado el centro del sistema, no en el Sol, sino en el centro del deferente de la Tierra, posición que correspondería a la de

un ficticio «Sol medio» que, visto desde nuestro planeta, tuviese un movimiento desprovisto de irregularidades. De modo que el sistema copernicano, en contra de lo que vulgarmente se cree, no era *heliocéntrico*, sino *heliostático*. Kepler lo convertiría en heliocéntrico, estableciendo además que los planos de las órbitas de los planetas, que hasta el momento se consideraban variables, debían intersecarse, no en el centro de la órbita terrestre, sino en el mismo Sol. En tal caso su inclinación se mostraba constante (la de Marte, en concreto, resultaba de 1.º 50'). La segunda modificación de Kepler se refería a la órbita de la Tierra. Para describirla, Copérnico había utilizado sólo una excéntrica mientras que, en el caso de los demás planetas, había añadido un epiciclo para dar cuenta de la variación de la velocidad en sus órbitas. De modo que la Tierra se encontraba en un caso especial de movimiento uniforme. Considerándola un planeta más sometido a la influencia solar, Kepler usará un ecuante para introducir una diferencia de velocidad entre el afelio y el perihelio. Con esta nueva disposición encontró que podía dar cuenta igualmente bien del movimiento de nuestro planeta; sin embargo, la variación de su distancia media al Sol se reducía a la mitad.

Ahora bien, para estudiar el caso de Marte, Kepler debía utilizar un conjunto de observaciones realizadas desde la Tierra. En un sistema heliocéntrico, estas mediciones debían necesariamente trasladarse al Sol como referencia, y para ello debían conocerse bien todas las características del movimiento terrestre, incluída la distancia al Sol en cada momento. De modo que Kepler intentó obtener la variación de esta distancia mediante la medición, a lo largo de un año completo, de los diámetros aparentes del Sol. Esto le obligó a realizar importantes estudios en el campo de la óptica, pero le condujo a escasos resultados prácticos. De modo que atacó el problema desde otro ángulo.

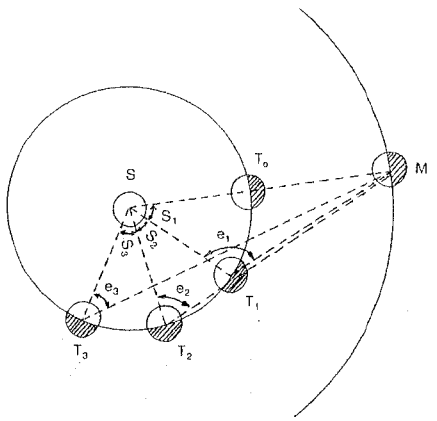

Figura 4.6.

Consideremos la figura 4.6. En ella se ven el Sol, la órbita de la Tierra, y la de Marte. El período sidéreo de Marte es, aproximadamente, de 687 días, al cabo de los cuales Marte ha descrito una revolución completa y se vuelve a encontrar en el mismo punto de su órbita. Consideremos el instante de la oposición, momento en el que Marte ocupa, respecto de la Tierra, situada en T_0, una posición diametralmente opuesta al Sol. Al cabo de 687 días, Marte volverá a

ocupar la misma posición M; la Tierra, sin embargo, tiene un período de 365,25 días, por lo que no habrá llegado a describir dos revoluciones completas en este intervalo, encontrándose en T_1. Transcurridos otros 687 días, estará en T_2, luego en T_3, etc. Se forman así una serie de triángulos SMT_1, SMT_2, SMT_3, etc. Lo que Kepler desea conocer son las distancias de la Tierra al Sol ST_0, ST_1, ST_2, etc. Los ángulos s_1, s_2, etc., representan distintas posiciones del Sol sobre la eclíptica, cada 687 días, y este movimiento solar aparente era bien conocido; los ángulos e_1, e_2, etc., se conocen también gracias a las observaciones de Marte realizadas en las distintas oposiciones del planeta. Si, finalmente, tomamos la distancia SM como unidad, podremos, resolviendo los triángulos, conocer las distancias de la Tierra al Sol SE_1, SE_2, etc., en términos de SM.

Gracias a esto Kepler encontró que la órbita terrestre era un círculo con el Sol ligeramente desplazado del centro, y que sobre tal círculo el movimiento de la Tierra no era uniforme.

Reducidas al Sol las observaciones de Marte, Kepler ensaya un modelo de excéntrica con ecuante, representado en la figura 4.7. En él C es el centro del deferente, AB la línea de ápsides (que une el afelio con el perihelio), S es el Sol, y E el ecuante. Las excentricidades e_1 y e_2, respectivamente, son las distancias del Sol y del ecuante al centro C. El problema de la órbita marciana se resolverá determinando la posición de la línea de ápsides en un momento dado, y ambas excentricidades. Pero ello era algo que sólo podía hacerse por tanteo, y los cálculos, en cuya descripción no entraremos, fueron difíciles, largos y tediosos. (El borrador de Kepler, que se conserva hoy, consta de 900 folios escritos con letra pequeña).

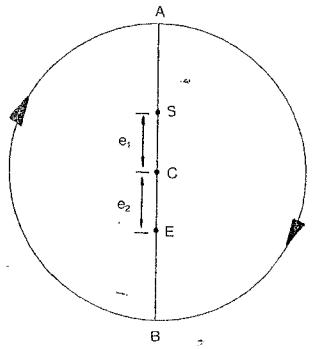

Figura 4.7.

Finalmente, Kepler llega a encajar sus datos en el modelo con una precisión de 2 minutos de arco para las longitudes heliocéntricas. Pero, sin embargo, las latitudes se desviaban hasta 8 minutos de arco, un error que no podía adjudicarse a los precisos datos obtenidos por Tycho. A este modelo, que a cualquier astrónomo del momento hubiese resultado satisfactorio, lo denominó su «hipótesis vicaria», pues sólo resultaba ser una aproximación a la solución que buscaba. Kepler podía introducir en su modelo un artificio matemático para salvar las apariencias; pero ése no era su objetivo: estaba firmemente convencido de que la geometría del modelo debía reflejar fielmente la realidad física.

Otro menos cabezota lo hubiese dejado correr, pero Kepler volvió a

empezar desde el principio. Hemos visto que, en su modelo de excéntrica con ecuante representado en la figura 4.7. había dejado indeterminadas las dos excentricidades e_1 y e_2; Ptolomeo, por su parte, las había considerado iguales, algo que el mismo Kepler había aplicado a la Tierra. Por otra parte, seguía convencido del origen solar del movimiento planetario. Pensaba que el influjo solar (sobre la naturaleza de la fuerza solar se hablará un poco más adelante), debía disminuir proporcionalmente a la distancia.

Kepler se puso a trabajar en esta última idea. En el caso de la Tierra, la proporcionalidad se cumplía bien en el afelio y en el perihelio. Ahora debía ver si sucedía lo mismo en los restantes puntos de la órbita. El tiempo que emplease la Tierra en recorrer una pequeña porción de la órbita (tan pequeña como para que su distancia al Sol pudiese considerarse constante mientras la recorría) debía ser inversamente proporcional al impulso recibido del Sol, es decir, inversamente proporcional a la distancia. De modo que el intervalo de tiempo que el planeta invertía en recorrer una porción determinada de su órbita (suma de todos los pequeños intervalos de tiempo anteriores) dependería de la suma de las distancias correspondientes. Kepler asimiló (no muy correctamente) esta última suma a un área. De ahí surgió una ley conocida hoy como la segunda ley de Kepler o «ley de las áreas»: la línea que une al Sol con el planeta barre áreas iguales en tiempos iguales (véase la figura 4.8.).

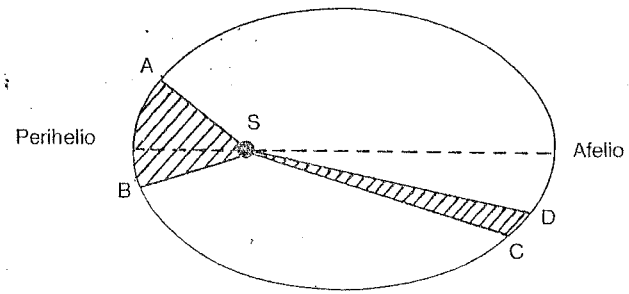

Figura 4.8. Ley de las áreas. Si las dos áreas sombreadas son iguales, el planeta recorrerá los arcos AB y CD en el mismo tiempo. De modo que en el perihelio se moverá más rápido que en el afelio.

Habiendo constatado que la Tierra cumplía bien esta ley, Kepler retornó al problema de Marte. Pero cuando aplicó la ley de las áreas a este planeta, encontró que no se cumplía: iba demasiado rápido en los ápsides y demasiado lento en los puntos intermedios (cuadrantes). En este punto, el lector comenzará a entrever que, si se ha de mantener la ley de las áreas, la órbita ya no puede ser circular: debería poseer más área en torno a los ápsides, o menos en las posiciones intermedias, o ambas cosas a la vez.

Kepler también comenzaba a entreverlo, por más que durante un tiempo estuviese dispuesto a abandonar su ley de las áreas en favor de la tradicional circularidad de la órbita. Pero un último e infructuoso intento de encajar las posiciones marcianas en un círculo le acabó de convencer. Kepler renuncia aquí al otro principio básico que había guiado toda la indagación astronómica. Así, vuelve al viejo método y comienza a jugar con un epiciclo, buscando la curva resultante; lo que resulta es un ovoide, es decir, una figura en forma de huevo, con la parte más achatada dirigida hacia el Sol (Fig. 4.9). Falto de teoría geométrica que le permita tratar con él, Kepler se sumergió en un mar de cálculos y de confusión. A pesar de todo, las cosas no cuadraban.

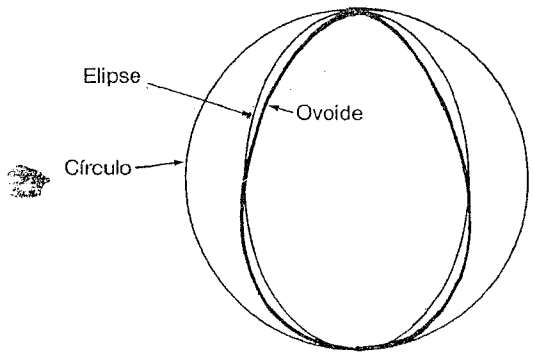

Figura 4.9.

Ahorraremos al lector los detalles que siguen. Kepler siguió probando y probando, y en el transcurso de las pruebas llegó a dar con una regla que señalaba la diferencia sistemática que había entre el círculo y la trayectoria que estaba buscando: esta regla indicaba que se trataba de una elipse. Pero Kepler no lo vio (las matemáticas de entonces no eran las de hoy), y la abandonó para ensayar precisamente una trayectoria elíptica. (De hecho, había venido utilizando la figura elíptica como una herramienta auxiliar que aproximaba la curva que estaba buscando; pero no le otorgó sentido físico real, pues la elipse tenía dos focos, mientras que Kepler buscaba una curva con un solo foco, situado en el Sol). Por fin se convenció: la órbita consistía en una elipse, muy próxima (como las restantes del Sistema Solar) a una circunferencia, con el Sol en uno de sus focos. Y esto, como pudo constatar, era válido para todos los planetas. La ley se conoce hoy como la primera ley de Kepler.

Toda la investigación de Kepler sobre la órbita marciana fue final y prolijamente recogida, punto por punto, en su *Astronomia nova,* publicada en 1609. El trabajo había finalizado en 1605 y Kepler había invertido en él cinco años.

4.3.3. La música de las esferas

La búsqueda del arquetipo geométrico del cosmos por parte de Kepler se extendía más allá del dominio de la astronomía; prentendía encontrar el esquema de la totalidad de la creación. En su *Harmonice mundi,* finalizado en 1618 y publicado al año siguiente, retomaba el esquema de su *Misterium cosmographicum* y trataba la idea de la existencia de una armonía matemática universal que se extendía desde la geometría a la música y de ésta a la astrología y a la astronomía.

Esta armonía consistía para Kepler en ciertas proporciones. Los pitagóricos las habían establecido aritméticamente, a partir de las divisiones de una cuerda vibrante, para la teoría musical. Kepler piensa que su origen no es aritmético, sino geométrico, y trata de deducirlas a partir de las divisiones engendradas en una circunferencia en la que se inscriben los distintos polígonos regulares. La cuestión es complicada, y no insistiremos en ella.

La parte astronómica de la obra, el Libro V, muestra cómo las armonías y consonancias musicales se extienden a los orbes planetarios. Kepler intentó encontrar estas proporciones armónicas en la sucesión de tamaños de los planetas, en sus períodos, en sus velocidades extremas, en las variaciones de su velocidad,... Las cifras no fueron significativas hasta que adoptó al Sol como punto de referencia de los movimientos y constató que las velocidades angulares (los arcos recorridos en la unidad de tiempo) de cada planeta en el afelio y en el perihelio guardaban una proporción de este tipo. Esto resultaba cumplirse no sólo para cada planeta, sino también para cada par de planetas. Tomando las proporciones de las sucesivas velocidades de todos los planetas como intervalos musicales, aparece una composición musical a seis voces.

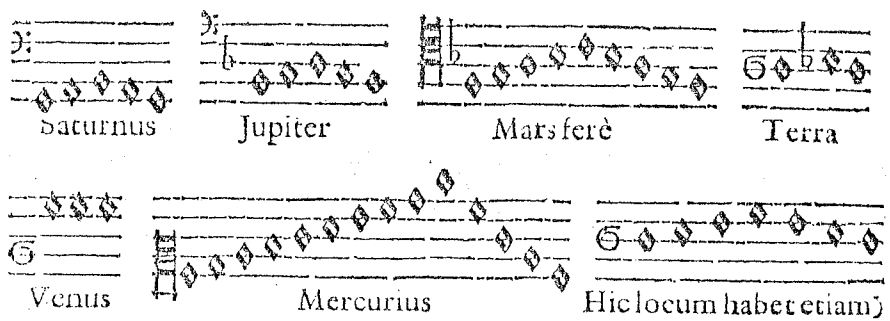

Figura 4.10. La música de los planetas de Kepler, de su *Harmonice mundi* (1619).

El descubrimiento de esta «sinfonía de los planetas» constituye el cuerpo principal del Libro V del *Harmonice.* Sin embargo, poco antes de su impresión, jugando con los números, Kepler encontró otra ley cuya plena

importancia sólo se revelaría más adelante. Halló que la proporción entre los períodos de revolución de dos planetas cualesquiera es la de sus distancias medias al Sol elevada al exponente 3/2. O, dicho en otros términos, que para cada planeta el cuadrado de su período es proporcional al cubo de su distancia media. Se la conoce como tercera ley de Kepler.

4.3.4. La fuerza solar

Siendo la velocidad de cada planeta inversamente proporcional a su distancia al Sol, a Kepler le resultaba evidente que la causa del movimiento de los planetas debía residir en el Sol mismo, y debilitarse con la distancia al centro.

Esta idea tenía consecuencias muy notables. Llevaba a rechazar toda la distinción aristotélica entre física celeste y terrestre basada en los lugares naturales; todos los lugares del espacio interplanetario kepleriano son así idénticos. Además, demandaba la introducción de un concepto nuevo, el de inercia, que redefinido más adelante mostraría su trascendental importancia. En efecto, rotos por Tycho los orbes sólidos de la cosmología aristotélica, ¿qué era lo que mantenía en su lugar a los planetas? Kepler piensa que se trata de una inercia, de una tendencia natural al reposo (y en este sentido el concepto está ligado a la física aristotélica), de una impotencia de moverse a sí mismo, que será tanto mayor cuanto mayor sea la magnitud o «voluminosidad» del cuerpo (no cabe hablar aquí todavía de su masa) y que se opondrá constantemente a la acción de toda fuerza que lo mueva. Así, la velocidad de un cuerpo resultará de la proporción entre la fuerza motriz y su inercia.

Kepler encontró en el magnetismo una de las claves de la naturaleza de las fuerzas motrices que actúan en el Sistema Solar. En 1600, William Gilbert publicaba una obra que ejerció gran influencia, su *De magnete.* En ella estudiaba las propiedades magnéticas (teñidas de un fuerte matiz animista) y mostraba que la Tierra se comportaba como un gran imán. En concreto, pensaba que el carácter circular de la acción magnética daba cuenta del movimiento de rotación de nuestro planeta.

En su *Astronomia nova,* Kepler aceptó acciones inmateriales de naturaleza similar a la luz como causa del movimiento orbital de los planetas; el Sol emite una «species motrix», una virtud motriz, que se extiende a los orbes planetarios haciéndolos girar —como por otra parte al mismo Sol— en círculos, con una velocidad angular inversamente proporcional a su distancia. Puede visualizarse esto considerando a la species como los radios de una rueda que, al girar con el cuerpo del Sol, arrastran tangencialmente a los planetas; cuanto más cerca del Sol está el planeta, mayor es la fuerza de esos rayos y, por consiguiente, mayor es su velocidad. Pero este movimiento es estrictamente circular y uniforme, y hay que superponerle el efecto de la

excentricidad para dar cuenta de las variaciones en la velocidad orbital. Para ello supone que el Sol es como un gran imán, con uno de sus polos en el centro y el otro en su superficie, y que cada planeta posee un eje magnético, que Kepler hace de dirección fija en el espacio; siendo sus polos de signos opuestos, el planeta será atraído por el Sol durante la mitad de su trayecto y repelido durante la otra mitad, según cuál sea el signo del polo más próximo. La inclinación de las órbitas se explica por la adición en cada planeta de un nuevo eje magnético.

Más tarde, en su *Epitome astronomiae copernicanae* (1618-1621), Kepler modificará este esquema. Ahora atribuirá los movimientos de rotación de la Tierra y el Sol a la presencia de sendas facultades o «espíritus motrices» encargados de renovar constantemente un impetus inicial impreso por Dios. El movimiento orbital se sigue atribuyendo a una species motrix que emana del Sol; pero ahora Kepler elimina las fuerzas magnéticas que dan cuenta de la excentricidad, pues éstas se ejercen entre el planeta y el Sol, es decir, son mutuas, y por consiguiente podrían mover a éste. Así, establece una acción unilateral, admitiendo que la fuerza solar es de una naturaleza cuasi-magnética tal que, teniendo los planetas una parte «amiga» y otra «enemiga», los atrae o repele según una u otra parte esté vuelta hacia el Sol. Kepler sigue explicando este mecanismo mediante la analogía con los fenómenos magnéticos, si bien de una manera obscura; no entraremos en detalles.

4.4. Galileo y la astronomia telescópica

Como se ha mencionado anteriormente, los sistemas ptolemaico, copernicano y tychónico, pese a conducir a trayectorias distintas para los planetas, resultaban en todo observacionalmente equivalentes. La paralaje de las estrellas fijas, única prueba con la que se podía distinguir el sistema de Copérnico, no se había observado; pero esto, en todo caso, sólo indicaba que las estrellas se hallaban más alejadas de lo que se creía y que los instrumentos astronómicos de la época no alcanzaban a discernirla. Tal era la situación cuando el telescopio irrumpió en la escena.

Las circunstancias concretas del descubrimiento del catalejo (sólo más tarde se le bautizaría como telescopio) no se saben con detalle. Su papel en la astronomía, sin embargo, es mejor conocido, y generalmente se fecha su introducción en 1609, cuando Galileo lo apuntó a los cielos. Si bien no fue el primero en hacerlo; poco antes, Thomas Harriot había observado la Luna. De cualquier modo, Galileo fue el primero en usarlo sistemáticamente para indagar el firmamento.

Galileo examinó la Luna en el otoño de 1609, con un catalejo de su propia construcción, que alcanzaba unos veinte aumentos. La apariencia de

nuestro satélite siempre había constituído una incógnita. La tradicional perfección de los orbes celestes exigía que tanto la Luna como los demás planetas fuesen lisos y esféricos, como dotados de una naturaleza distinta a la terrestre. Las manchas que, sin embargo, presenta a simple vista fueron explicadas ad hoc mediante ideas tales como la existencia de regiones de diferente densidad. En principio, el catalejo no tenía por qué cambiar las cosas. Contra lo que se afirma en ocasiones, Galileo no vio montañas en la Luna; lo que vio fue una distribución cambiante de luces y sombras. Que interpretase tal distribución como muestra de un relieve análogo al terrestre es un exponente de sus convicciones, si no copernicanas, sí cuanto menos antiaristotélicas, al hallarse predispuesto a otorgar a la Luna la misma naturaleza terrestre. No en vano dedicó varias páginas de su *Sidereus Nuncius* (1610), en donde da cuenta de sus descubrimientos telescópicos, para llevar de la mano al lector desde este patrón de manchas a la existencia de verdaderas montañas y valles. Las sombras y luces cambiantes se explican como el resultado de la iluminación solar; es lo mismo que sucede con las sombras que arrojan las montañas a la salida del Sol, al principio muy largas y encogiendo a medida que el Sol asciende en el cielo.

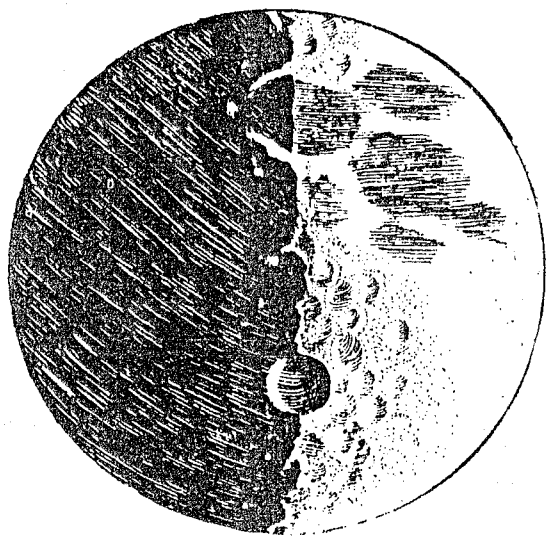

Figura 4.11. Dibujo de la Luna por Galileo.

Tras la Luna, Galileo dirigió su atención a los planetas. Estos, a diferencia de las fijas, que aun a través del telescopio se seguían apreciando como puntos luminosos, se veían como discos, una prueba de su relativa proximidad en relación con las estrellas y una justificación para la ausencia de

paralaje detectable en éstas. A principios de 1610 observó a Júpiter, y halló próximas a él tres pequeñas y brillantes estrellas. Tres *estrellas.* La observación durante las noches subsiguientes le mostró en ocasiones tan sólo dos de ellas, y también que su posición cambiaba de un lado a otro del planeta, sin que se separasen de él. Su interpretación de estas estrellas, cuyo número terminó cifrando en cuatro, como lunas o satélites de Júpiter, necesitó de una cierta dosis de copernicanismo. Galileo había encontrado en Júpiter y sus satélites una suerte de justificación al giro de la Luna en torno a la Tierra, a la vez que una analogía del Sol con sus planetas girando alrededor.

Otro importante hecho de los cielos lo halló observando a Venus. Encontró que, al igual que la Luna, este planeta presentaba fases a lo largo de una revolución completa. Se trataba entonces de un cuerpo opaco que, como la Tierra o la Luna, reflejaba la luz del Sol. Todavía más, como en el disco del planeta se apreciaban plenamente las fases «nueva» y «llena», resultaba claro que debía girar en torno al Sol, contrariamente a lo afirmado por el sistema ptolemaico. Cuando dirigió su anteojo a las estrellas, éstas se

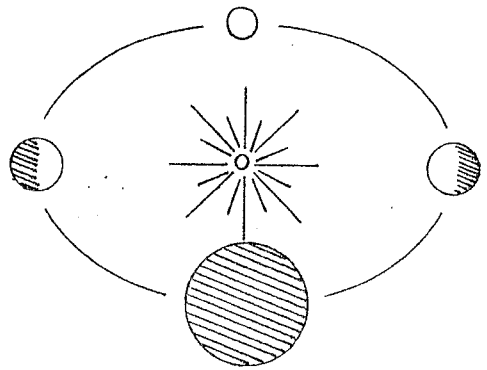

Figura 4.12. Fases de Venus.

multiplicaron. Aparecieron por todas partes nuevas estrellas que antes nunca habían podido contemplarse. La misma nebulosidad de la Vía Láctea se resolvió en un conglomerado de brillantes puntos de luz.

Otro aspecto novedoso en los cielos o constituyó la observación de las manchas solares. En 1610 Thomas Harriot efectuó la primera observación telescópica del Sol, y a partir de esta fecha algunos astrónomos, entre ellos Galileo, comenzaron a hacer observaciones regulares. Lo que se pudo apreciar es la existencia de distintas manchas de aspecto cambiante, dotadas además de un movimiento que se atribuyó a la existencia de una rotación solar. El Sol, pues, no sólo no era tampoco tan perfecto como lo quería la tradición aristotélica, sino que tenía además un movimiento de giro, el cual

ya fuera postulado por Kepler como necesario para que la species motrix hiciese circular los planetas.

Es difícil exagerar el asombro y entusiasmo que provocó en Galileo este atisbo de un nuevo cosmos, antes nunca contemplado, del que salieron reforzadas sus convicciones copernicanas. Tampoco el de Kepler (por otra parte, ya sobradamente convencido), quien publicó diversas obras defendiendo los nuevos datos como prueba de su propia interpretación del sistema de Copérnico. Al difundirse rápidamente el nuevo instrumento y confirmarse sus observaciones, la fama de Galileo se extendió. Todos estuvieron de acuerdo en la gran importancia de los nuevos descubrimientos; pero el consenso iba a ser bastante menos unánime respecto de su interpretación, por lo demás igualmente buena en el sistema tychónico. Como veremos en el *Capítulo siguiente*, si Kepler pudo ser a la vez copernicano y hereje, a Galileo le iba a resultar imposible ser copernicano y católico.