

En el lugar adecuado, en el momento preciso

Ya sé que está todo en nuestra mente, pero la mente es algo muy poderoso.

Colin Cotterill¹

Dos hombres de paseo

Siempre me sorprendo cuando un joven me dice que quiere trabajar en cosmología; yo pienso en la cosmología como algo que le sucede a uno, no que uno pueda elegir.

William H. McCrea²

El anciano caballero que andaba por la calle tenía el mismo aspecto de siempre: distinguido pero algo despeinado, un poco al estilo bohemio, un europeo de paso lento en una avenida norteamericana, rostro apesadumbrado, resuelto pero sin fijarse realmente adónde iba, siempre captando la atención de los vecinos mientras atravesaba el flujo de compradores y de estudiantes que llegaban tarde a clase. Todos parecían saber quién era, pero él evitaba sus miradas. Aquel día tenía un nuevo compañero, muy alto y de constitución robusta, un poco desaliñado, pero de una forma distinta a la de su acompañante. Ambos estaban enfrascados en su conversación

mientras seguían su camino, andando y hablando, ajenos a los escaparates. El anciano escuchaba con atención, y a veces fruncía suavemente el ceño; su joven colega exponía sus razones con entusiasmo, gesticulando a veces desafortadamente, hablando sin parar. Ninguno de ellos era hablante nativo de inglés, pero sus diversos acentos sugerían resonancias de muchos lugares. Resueltos a cruzar la calle, se detuvieron en el bordillo mientras pasaba el tráfico. Los semáforos cambiaron y cruzaron la calle en silencio, concentrados momentáneamente en la luz, el sonido y el movimiento relativo. De pronto, algo sucedió. El hombre alto empezó de nuevo a decir algo, moviendo la mano con rapidez. El tráfico había reanudado la marcha, pero el anciano se había quedado totalmente quieto, tan ajeno a los coches como a los peatones que se apresuraban. Las palabras de su compañero se habían apoderado por completo de sus pensamientos. Los coches rugían a un lado y a otro, dejándolos aislados como una isla humana en mitad del tráfico. El anciano estaba sumido en reflexión, el más joven reiteraba sus argumentos. Finalmente, recuperaron la conciencia del mundo que los rodeaba; sin embargo, olvidando hacia dónde iban, el anciano se dirigió en silencio a la acera de la que acababan de salir, y así siguieron, andando y hablando, de vuelta al lugar de donde venían, perdidos en este nuevo pensamiento.

Los dos hombres estaban hablando de universos.³ El lugar era Princeton, New Jersey, y el momento, durante la segunda guerra mundial. El joven era George Gamow, «Gee-Gee» para los amigos, un ruso que había emigrado a Estados Unidos. El anciano era Albert Einstein. Einstein se había pasado los treinta años anteriores demostrando cómo podíamos comprender el comportamiento de universos enteros mediante simples matemáticas. Gamow percibió que el pasado de esos universos debía de haber sido inimaginablemente distinto al presente. Lo que hizo que se quedasen parados en mitad de su paseo fue la sugerencia de Gamow de que las leyes de la física podían describir que algo se crease de la nada. Podía ser una única estrella, ¡pero también todo un universo!

Qué curiosos, los universos

La historia es la suma de todo aquello que podía haberse evitado.

Konrad Adenauer

¿Qué es el universo? ¿De dónde ha venido? ¿Hacia dónde va? Estas preguntas parecen simples, pero se encuentran entre las más trascendentales jamás formuladas. Según cuánto se sepa, son muchas las respuestas a la pregunta de lo que queremos decir con «universo».⁴ ¿Es todo lo que podemos ver en el espacio, incluyendo de regalo el espacio mismo entre los objetos? ¿O es todo lo que físicamente existe? Cuando se redacta una lista de cosas que lo incluya «todo», uno empieza a hacerse preguntas sobre eso que los físicos llaman «leyes de la Naturaleza» y otros intangibles como el espacio y el tiempo. Aunque no se pueden tocar ni ver, sí se pueden sentir sus efectos, parecen ser bastante importantes y parece que existen —es algo parecido a lo que sucede con las reglas del fútbol—, así que será mejor que también las incluyamos en el paquete. ¿Y qué decir del futuro y el pasado? Centrarse solo en lo que existe ahora parece un poco excluyente. Y, si incluimos como parte del universo todo lo que ha existido, ¿por qué no incluir también el futuro? Con todo esto, la definición con la que nos encontramos es que el universo es todo lo que ha existido, existe y existirá.

Si nos ponemos pedantes de verdad, podemos asumir un punto de vista aún más amplio del universo, que no solo incluya todo lo que puede existir, sino todo lo que *podría* existir; y, para terminar, incluso todo lo que no puede existir. A algunos filósofos medievales⁵ les atraía esta idea de completitud, la inclusión de todo lo que no ha existido, no existe y no existirá en el catálogo de lo que fue, es y será. Este punto de vista parece destinado a crear nuevos problemas en un área que ya tiene suficientes. Sin embargo, últimamente ha vuelto a aparecer en los estudios modernos del universo, si bien con un aspecto ligeramente distinto. Los cosmólogos modernos no solo están interesados en la estructura y la historia de nuestro universo, sino también en los otros tipos de universos posibles. Nuestro universo tiene un gran número de

propiedades especiales y sorprendentes (al menos, para nosotros) que queremos evaluar para comprobar si podrían haber sido distintas. Eso significa que debemos poder generar ejemplos de «otros» universos con los que poder compararnos.

De eso trata la cosmología moderna. No es solo un ejercicio de descripción de nuestro universo de la forma más completa y precisa posible: trata de situar esa descripción en un contexto más amplio de posibilidades que el actual. Se pregunta *por qué* nuestro universo tiene estas propiedades y no otras. Por supuesto, puede que al final descubramos que no hay ningún otro universo posible (cuya estructura, contenido, leyes, edad, etc., sean distintas de algún modo que nosotros podamos concebir) aparte del que vemos. Durante mucho tiempo, los cosmólogos suponían (esperaban, incluso) que ese resultaría ser el caso. Pero últimamente las aguas han empezado a fluir en dirección contraria, y parece que nos enfrentamos a muchos universos posibles, todos ellos coherentes con las leyes de la Naturaleza. Y, para acabarlo de rematar, puede que esos universos no sean meras posibilidades: quizá existan en el mismo sentido que atribuimos a las cosas ordinarias como tú y yo, aquí y ahora.

La importancia del lugar

Y [Jacob] tuvo un sueño; soñó con una escalera apoyada en tierra, y cuya cima tocaba los cielos, y he aquí que los ángeles de Dios subían y bajaban por ella.

Libro del Génesis⁶

Las personas llevan miles de años hablando del universo. De su universo, claro está, que no debemos confundir con el nuestro. Para muchos, se trataba simplemente de la tierra que pudieran alcanzar en un viaje. O quizá fuese el cielo nocturno de planetas y estrellas que podían ver a simple vista. La mayor parte de culturas antiguas intentaron crear una imagen o un relato acerca de lo que veían a su alrededor, ya fuese en el cielo, en la tierra o bajo el mar.⁷ Esta intención de tomar

perspectiva no indicaba un interés por la cosmología, sino que simplemente era importante para convencerse a sí mismos —y a otros— de que las cosas tenían un sentido, y de que estas formaban parte de ese sentido. Admitir que había partes de la realidad de las que no tenían noción ni control en absoluto generaba una peligrosa incertidumbre. Por eso los antiguos mitos sobre la naturaleza del universo parecen siempre tan completos: cada cosa tiene su sitio y hay un sitio para cada cosa. No hay «quizá», no hay excepciones, no hay incertidumbre y no hay posibilidades a la espera de una investigación más profunda. Eran verdaderas «teorías del todo», pero no hay que confundirlas con ciencia.

El tiempo y el lugar que nos corresponden en la Tierra influyen en el sentido que le damos al universo que nos rodea. Si uno vivía cerca del Ecuador, los movimientos aparentes de las estrellas cada noche eran claros y simples. Salían, pasaban sobre tu cabeza a lo largo de la noche, descendían y se ponían por el horizonte contrario. Todas las noches eran iguales, y la sensación era que uno se encontraba en el centro de estos movimientos celestiales. Pero, si uno vivía lejos de los trópicos, el aspecto de los cielos era muy distinto. Algunas estrellas se alzaban sobre el horizonte y se ponían más tarde durante la noche; subían derechas hacia arriba por encima de la cabeza antes de volver a caer hacia el horizonte. Otras nunca subían o se ponían y permanecían siempre por encima del horizonte. Parecían trazar círculos alrededor de un gran centro celestial, como si estuviesen pegadas a una rueda que girase alrededor de su eje. Las personas debían de preguntarse qué es lo que era tan especial de ese lugar alrededor del que giraban las estrellas. Los habitantes de las latitudes septentrionales idearon muchos mitos y leyendas acerca de la gran rueda de molino del cielo para dotar de sentido a ese nocturno torbellino de estrellas.

La razón de esta variación en el aspecto aparente del cielo nocturno en diversos lugares del mundo es la inclinación del eje alrededor del cual la Tierra gira cada día (Figura 1.1). A medida que la Tierra orbita alrededor del Sol, la línea que atraviesa los polos Norte y Sur de la Tierra,⁸ alrededor de la cual gira cada día, no permanece perpendicular a la línea que la órbita traza. Está inclinada respecto de la vertical unos 23,5 grados. Las consecuencias de ello son muchas y

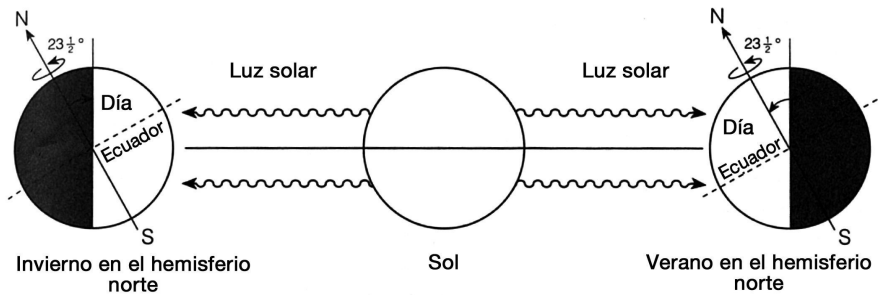


FIGURA 1.1. El eje de rotación de la Tierra, que pasa por los polos Norte y Sur, está inclinado unos 23,5 grados respecto de la vertical perpendicular al plano orbital de la Tierra.

notables: es lo que causa las estaciones, por ejemplo. Si no existiese esta inclinación, no existirían los cambios climáticos estacionales; si fuese mucho mayor, las variaciones serían mucho más acusadas. Sin embargo, si uno no sabe nada del movimiento de la Tierra alrededor del Sol ni de la inclinación de su eje y se limita a mirar las estrellas en el cielo cada noche, la inclinación garantiza que la vista del cielo será muy distinta en diferentes latitudes de la Tierra.

Si extendemos la línea que va del polo Sur al Norte hacia el espacio, señala en una dirección a la que llamamos Polo Norte Celeste y en dirección contraria al Polo Sur Celeste. A medida que la Tierra gira sobre sí misma, veremos que, aparentemente, las estrellas fijas cruzan el cielo girando en la dirección contraria. Si permanecen visibles, completarán un gran círculo en el cielo cada vez que la Tierra complete una de sus revoluciones diarias.

Sin embargo, estas trayectorias circulares que cruzan el cielo no serán visibles en su totalidad para nosotros, porque parte de la trayectoria estará debajo del horizonte. En la Figura 1.2 se muestra lo que un observador de los cielos que viviese a una latitud de L grados en el hemisferio norte vería en una noche despejada.⁹

El horizonte de nuestro observador divide el cielo en dos mitades. En cada momento, solo es visible la parte que queda por encima del horizonte. Observar desde una latitud de L grados norte significa que el Polo Norte Celeste se halla L grados por encima del horizonte, y el Polo Sur Celeste, L grados por debajo. La rotación de la Tierra hace

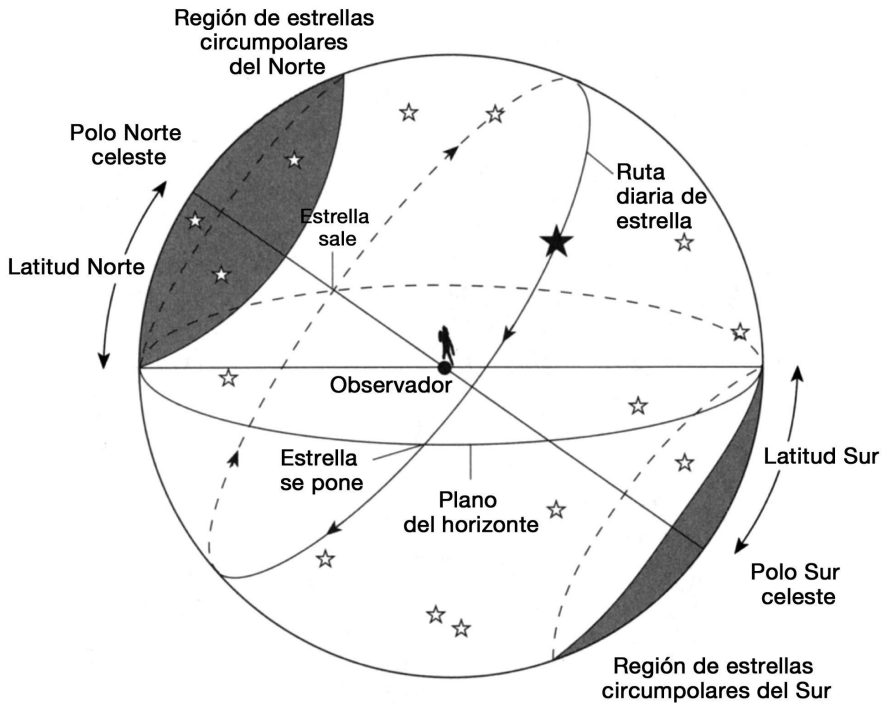


FIGURA 1.2. El cielo que ven los astrónomos situados a una latitud de L grados Norte. En un momento determinado solo es visible para ellos la mitad del cielo. Algunas estrellas, las circumpolares del Norte, están tan cerca del polo Norte celeste que nunca se ponen por debajo del horizonte. Un segundo grupo, alrededor del polo Sur celeste, denominadas estrellas circumpolares del Sur, nunca están a la vista de estos astrónomos porque no salen por encima del horizonte.

que el cielo parezca rotar hacia el oeste alrededor del Polo Norte Celeste. Las estrellas se ven elevarse por encima del horizonte este y ascender por el cielo hasta llegar a su punto más alto, o «cenit»; a continuación descienden y se ponen por el horizonte oeste.¹⁰

Hay dos grupos de estrellas que no siguen esta rutina nocturna de salir y ponerse. Las estrellas que se hallan dentro de un círculo que se extiende L grados desde el Polo Norte Celeste completan sus aparentes círculos en el cielo sin desaparecer nunca bajo el horizonte. Si el cielo está despejado y oscuro, estas estrellas son siempre visibles.¹¹ Para los actuales observadores del cielo de Europa, se trata de las es-

trellas de los grupos de la Osa Mayor y Casiopea. A su vez, hay una colección de estrellas en el sur, en una región circular del mismo tamaño alrededor del Polo Sur Celeste, que el observador del hemisferio sur de la Figura nunca puede ver, porque nunca se elevan por encima de su horizonte.¹² Es por ello que la constelación Cruz del Sur nunca es visible desde Europa, que está en el Norte. Es de crucial importancia darse cuenta de que el tamaño de estas regiones del cielo que son siempre visibles o invisibles varía con la latitud del observador. A medida que la latitud aumenta y nos alejamos del Ecuador, el tamaño de estas regiones se incrementa también. En la Figura 1.3 se muestra el aspecto del cielo para observadores situados en tres latitudes terrestres muy diferentes.

En el Ecuador, la latitud es cero y no hay regiones de estrellas que siempre son visibles o que no lo son nunca. Un observador del cielo ecuatorial puede contemplar cualquier estrella, aunque, en la práctica, los dos Polos Celestes se pierden en la neblina del horizonte. Las estrellas salen y llegan a su punto más alto en el cielo. Cuando cada estrella sale, su dirección permanece más o menos constante, y eso la convierte en una excelente baliza de navegación para viajar por tierra o por mar durante la noche. Apenas hay movimiento lateral en la oscuridad del cielo, que parece simétrico y simple. Nuestros observadores celestes tienen la impresión de hallarse en el centro de todo, bajo un celestial dosel de arcos y movimientos predecibles que parecen estar allí para su propia comodidad. El universo se comporta como si ellos fuesen la pieza central.

En el caso extremo del Polo Norte, la latitud es de 90 grados, y las estrellas visibles no salen ni se ponen, sino que se mueven en círculos por el cielo. El Polo Norte Celeste se encuentra justo encima de nuestra cabeza y las estrellas giran a su alrededor. La impresión es que se trata del foco del universo y que nosotros nos hallamos debajo de él.

En latitudes norte más templadas, como la del antiguo Stonehenge en Gran Bretaña, a 51 grados, la situación es intermedia. Las estrellas que se hallan dentro de un círculo de 51 grados del Polo Celeste se verán describiendo círculos concéntricos en el cielo, con el Polo en su centro. Otras estrellas se alzarán por encima del horizonte, ascenderán hacia su cenit, para acabar descendiendo y poniéndose. El cielo pare-

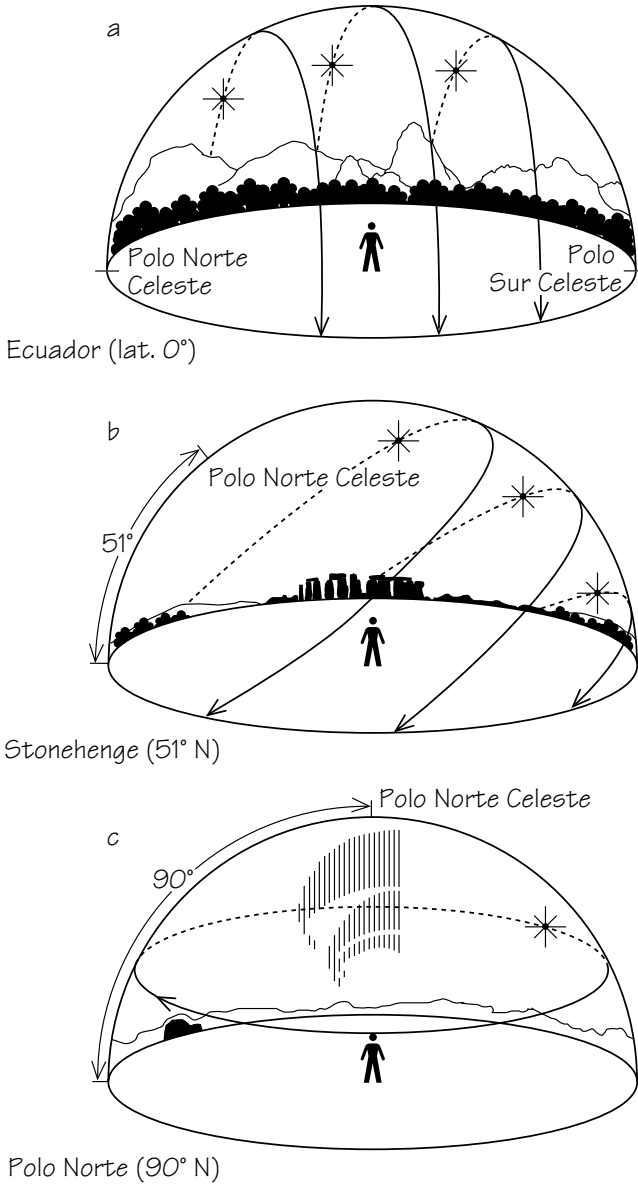


FIGURA 1.3. La apariencia del cielo nocturno visto desde tres latitudes distintas en la Tierra. La diferencia se debe al cambio de posición del Polo Celeste alrededor del cual las estrellas parecen girar: (a) en el Ecuador; (b) en la latitud de Stonehenge, Inglaterra; (c) en el Polo Norte.

ce estar extremadamente torcido. Las diferentes estrellas siguen rutas diferentes entre su alba y su ocaso. Pero lo más sorprendente de todo es el enorme torbellino de estrellas en la dirección del Polo Celeste, girando a su alrededor como si se tratase del eje de una gran rueda cósmica (Figura 1.4). Para los observadores sin conocimiento alguno de astronomía o del movimiento de la Tierra, parece que hay un lugar especial en el cielo.

Esta es una de las razones por las que los mitos sobre el cielo y la naturaleza del universo que nos rodea tienen una componente geográfica. Lejos del Ecuador, en Escandinavia y Siberia, hallamos leyendas sobre el gran círculo de los cielos: la rueda de molino en cuyo centro residen los dioses. La estrella más próxima al centro del celestial torbellino recibía una consideración especial: alojaba el trono del soberano del universo, alrededor del cual estaban dispuestas todas las estrellas.¹³



FIGURA 1.4. Una foto de exposición prolongada en la dirección del Polo Norte Celeste registra las trayectorias circulares de las estrellas alrededor del polo, situado justo encima del árbol del centro.

No voy aquí a rastrear estos mitos; solo quisiera resaltar la dificultad de llegar a hacerse una imagen del universo desde un punto de vista anclado en la Tierra. Cuando no se sabe nada acerca de las estrellas o la rotación o la orientación de la Tierra, no se es consciente de los sesgos que hay que superar.

Incluso cuando las más sofisticadas de las civilizaciones antiguas empezaron a efectuar observaciones astronómicas, siguieron chocando con la influencia de nuestro particular punto de vista. Estamos confinados en un pequeño planeta que, al igual que muchos otros, orbita alrededor de una estrella. Actualmente conocemos este sistema solar de planetas y los centenares de estrellas distantes que sabemos que tienen otros planetas orbitando a su alrededor (más de 500 hoy en día). Esta familiaridad hace que nos resulte fácil olvidar lo complicado que fue alejarse de una visión centralizada en la Tierra y comprender los movimientos de los otros planetas. Pensemos, como mero ejemplo de estas dificultades, en nuestra visión terrestre del movimiento de un planeta como Marte. Supondremos que tanto la Tierra como Marte giran alrededor del Sol en órbitas circulares, y que el radio de la órbita de Marte es aproximadamente una vez y media mayor que el de la órbita de la Tierra (Figura 1.5a). La Tierra tarda un año en completar su órbita, y supondremos que Marte tarda el doble en completar la suya. Ahora calcularemos la diferencia entre las dos órbitas en función del tiempo, y esto nos mostrará el movimiento aparente de Marte visto desde la Tierra. En la Figura 1.5b se muestra un gráfico de este movimiento aparente.

Es interesante fijarse en este curioso bucle con forma de corazón con un tramo cruzado (denominado «caracol de Pascal» o simplemente «caracol»). A medida que vamos hacia la izquierda desde la parte superior derecha vemos que Marte se aleja de la Tierra. Cuando cruzamos el eje horizontal en el punto -5, los dos planetas se encuentran en extremos opuestos del Sol, y a la máxima distancia posible entre sí. Entonces, a medida que Marte empieza a acercarse a la Tierra, algo extraño sucede. Marte se aproxima a la Tierra y parece como si fuese a chocar contra ella. Pero entonces invierte la dirección de su movimiento y se aleja de nuevo, para reanudar su largo período de alejamiento de la Tierra. Este movimiento «retrógrado» de Marte se

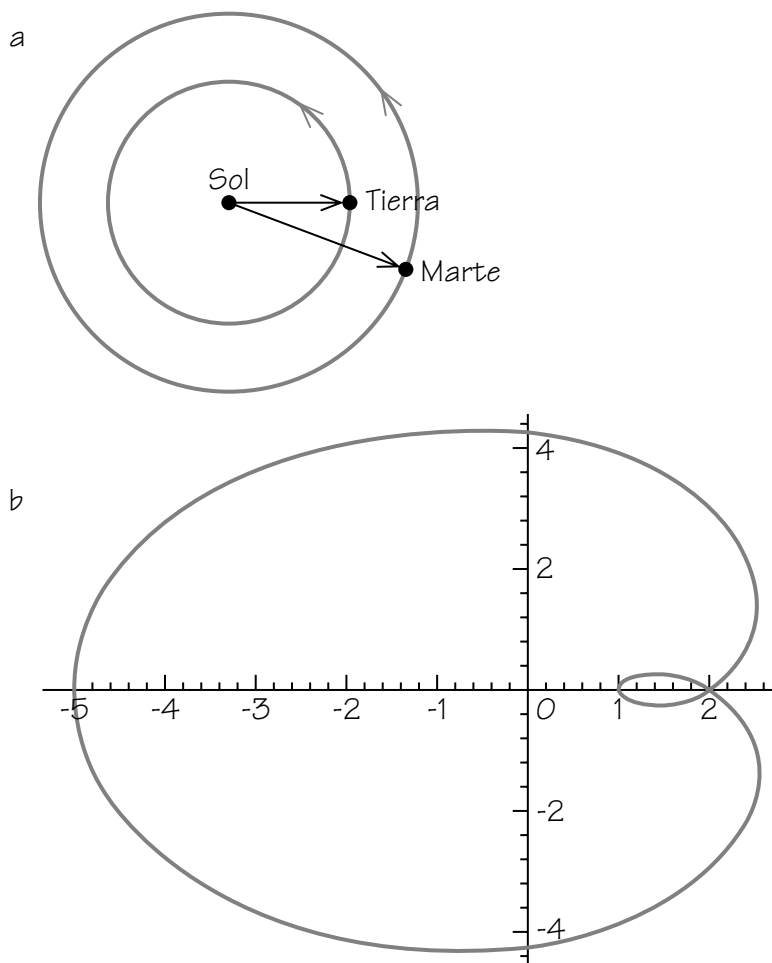


FIGURA 1.5. El movimiento aparente del planeta Marte tal como se observa desde la Tierra. (a) Las órbitas de la Tierra y de Marte, que se suponen circulares; el radio de la órbita de Marte es aproximadamente 1,5 veces el de la órbita de la Tierra. Marte tarda dos años (687 días terrestres) en completar su órbita. (b) La órbita de dos años de Marte, vista desde la Tierra, traza este bucle en forma de corazón, llamado *limaçon* o caracol de Pascal. Al principio, Marte se aleja, alcanzando su máxima separación de -5 cuando la Tierra y Marte se hallan en lados opuestos del Sol. A continuación, Marte regresa hacia su máximo acercamiento a la Tierra, pero de repente invierte el sentido y se aleja. Luego cambia de dirección en el cielo y se empieza a alejar de nuevo.

puede detectar a simple vista a lo largo de varias noches durante un período de proximidad. Vemos que aparece cada vez que dos planetas se mueven hacia su punto de máxima proximidad. Si, en cambio, nos fijamos en uno de los distantes planetas exteriores, como Saturno, que tarda 29,5 años terrestres en completar su órbita, se darán diversas ocasiones en las que el movimiento relativo Tierra-Saturno esté cerca de la máxima proximidad durante cada órbita completa de Saturno, de modo que en la imagen de la órbita aparente habrá varios bucles.¹⁴

La lección que podemos aprender de todo esto es que los movimientos celestiales son de difícil interpretación si no se dispone de una imagen global —o una teoría—. Un antiguo astrónomo que observase Marte a lo largo de dos años lo vería alejarse de nosotros y luego acercarse, antes de ser aparentemente repelido y alejarse de nuevo. ¿Qué fuerzas pueden estar actuando? ¿Por qué cambia de dirección el movimiento? Son preguntas difíciles de responder si uno se encuentra sobre la Tierra y no sabe que todas las órbitas (incluida la que contiene el punto de vista propio) giran alrededor del Sol a diferentes velocidades.

El universo esférico de Aristóteles

Un experto es una persona que evita los errores nimios para caer directamente en las grandes falacias.

Benjamin Stolberg

Una complicada imagen de estos movimientos celestiales aparentes surgió a partir de una visión filosófica del universo iniciada por Aristóteles alrededor del 350 a.C. con la intención de simplificar las cosas. Aristóteles creía que el mundo no había aparecido en algún punto del pasado, sino que había existido siempre y que siempre existiría, esencialmente inmutable. Aristóteles concedía un gran valor a la simetría, y creía que la esfera era la más perfecta de todas las formas. Por tanto, el universo debía ser esférico. Para poder encajar los objetos celestes

y sus movimientos, Aristóteles propuso una complicada estructura similar a una cebolla, con nada menos que cincuenta y cinco esferas anidadas de cristal transparente centradas en la Tierra, que también suponía esférica (una hipótesis muy complicada de cuadrar con lo que observaba). Cada uno de los cuerpos celestes observados estaba adherido a una de estas esferas de cristal, que giraban a distintas, aunque constantes, velocidades angulares. Entre las esferas que llevaban los movimientos planetarios había varias esferas adicionales. De esta forma, Aristóteles era capaz tanto de dar explicación a las observaciones como de predecir nuevos fenómenos que podían observarse. Muchas de las características de su teoría eran como las de una teoría científica moderna, pero muchas otras eran irreconocibles. En la imagen de Aristóteles, la esfera exterior era un reino en el que no podían existir los objetos materiales, un reino espiritual. Todos los movimientos que vemos los inició un *Primum movens* que actuaba en el límite de su reino y que causaba la rotación de la esfera externa. Esta rotación se comunicó hacia el interior, de una esfera a otra, hasta que todo el cosmos estuvo en un perfecto movimiento rotatorio. Ajustando las velocidades de rotación de las distintas esferas se podían explicar muchas de las características del cielo nocturno.

La filosofía de Aristóteles fue posteriormente absorbida y remodelada por los pensadores cristianos medievales, que identificaron al *Primum movens* con el Dios del Antiguo Testamento y la esfera exterior con el Cielo cristiano. La posición central de la Tierra concordaba con el papel central que jugaba la humanidad en la imagen medieval del mundo.

Una característica fundamental de la forma esférica para la Tierra y el resto de esferas exteriores era que, cuando una esfera gira, no corta el espacio vacío, en el que no hay materia, ni deja espacio vacío tras ella; véase la Figura 1.6a, que muestra una descripción efectuada en el siglo XVI por el eminente matemático y físico de la época Tudor Robert Recorde (1510-1558). La existencia del vacío era imposible, tanto como la de una cantidad física infinita.¹⁵ Una Tierra esférica estacionaria ocupa la misma parte del espacio mientras gira sobre sí misma. Si fuese un cubo, ese no sería el caso.¹⁶ De hecho, en el argumento aristotélico, la esfera no es la única forma posible para una

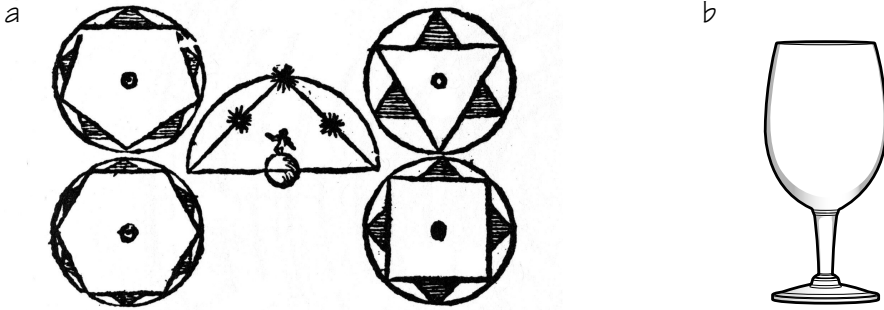


FIGURA 1.6. (a) Una esfera en rotación ocupa siempre el mismo volumen de espacio, pero otras figuras poliédricas crean un «vacío» al rotar. Esta «demostración» aristotélica de la esfericidad de la Tierra se muestra en la imagen de Robert Recorde tomada de su libro *Castle of Knowledge* (1556). Sin embargo, un universo en forma de copa de vino que girase alrededor de su eje vertical, como se muestra en (b), satisface también la condición de Aristóteles de que su rotación no deje ni cree vacío alguno.

Tierra en rotación que no dejase regiones de vacío ni entrase en ellas; un vaso de vino cumpliría las condiciones igual de bien.¹⁷

Aristóteles no pensaba que el movimiento lo originasen fuerzas entre objetos, tal como nosotros (a partir de Newton) concebimos la gravedad. Las fuerzas eran características innatas de los objetos en sí mismos; estos se movían de la forma que les resultaba «natural». El movimiento circular era el más perfecto y natural de los movimientos.

El universo «del profesor Franz de Copenhague» de Ptolomeo

Antes era astrónomo, pero me he quedado atranca-
do en el turno de día.

Brian Malow¹⁸

Ya hemos visto que, en un sistema solar en el que el Sol está en el centro y todos los planetas giran a su alrededor a distintas velocidades, se ven movimientos extraños en el cielo; otros planetas parecerán moverse hacia atrás durante un breve período. Se trata de una ilusión originada por nuestro movimiento con relación a esos planetas. Todos

orbitamos a distintas velocidades angulares, de modo que a veces vemos los otros planetas describiendo extraños movimientos de retroceso en el cielo. Aristóteles y sus seguidores necesitaban dar una explicación a esas observaciones.

El primero que encontró una solución a este provocador problema fue Claudio Ptolomeo, alrededor del año 130 d.C. Se trataba de lo más aproximado a una «Teoría de todo» en el mundo antiguo, y duró más de 1.000 años. La tarea de Ptolomeo era reconciliar los complicados movimientos de los planetas, incluso los retrógrados, con las rígidas especificaciones de Aristóteles, que decían que la Tierra se hallaba en el centro del universo y el resto de cuerpos se movían en órbitas circulares uniformes a distintas velocidades angulares constantes alrededor de la Tierra, y ninguno de los cuerpos del universo podía variar su brillo ni otras propiedades intrínsecas (Figura 1.7). Era un reto complejo.

Ptolomeo abordó este tremendo problema en su libro *El Almagesto* («El Más Grande»), considerando que la órbita circular de un planeta, o del Sol, alrededor de la Tierra trazaba el movimiento de un punto (o «deferente», como se denominaba). Este punto actuaba a su vez como centro de otro movimiento circular menor de ese planeta, denominado «epiciclo», a lo largo del cual se movía el planeta.¹⁹ El movimiento global del planeta tiene el aspecto de un círculo con un continuo vaivén en forma de tirabuzón, como se muestra en la Figura 1.8.

El movimiento global relativo a la Tierra de un planeta como Marte sería una órbita circular alrededor de un punto que, a su vez, orbitaba alrededor del Sol en un círculo. Ptolomeo pudo haber ido más allá en este desarrollo agregando más epiciclos (círculos moviéndose en órbitas circulares) a la órbita de ese planeta alrededor del Sol, como hicieron sus sucesores de la época medieval en busca de una mayor precisión.²⁰

Muchos son los aspectos que podían modificarse para ajustar con exactitud las características de los planetas en movimiento y del Sol a las observaciones. El movimiento retrógrado visto desde la Tierra queda perfectamente descrito con la adición de los epiciclos. Durante la mitad de la órbita del planeta alrededor de su pequeño epiciclo, el planeta se mueve en el mismo sentido que el movimiento alrededor

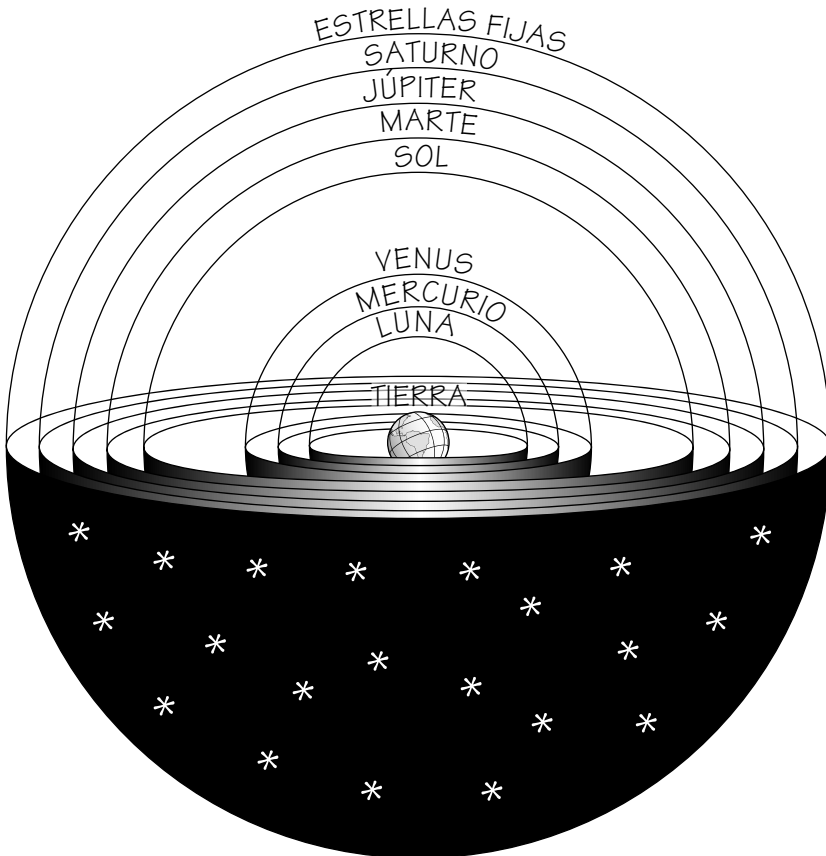


FIGURA 1.7. El modelo de universo de Aristóteles y Ptolomeo.

del deferente, pero durante la segunda mitad de la órbita alrededor del epiciclo, el planeta se mueve en la dirección opuesta, por lo que se observa un movimiento retrógrado. Tal como se ve desde la Tierra, el movimiento del planeta se haría ocasionalmente más lento, se detendría en el cielo y luego avanzaría en dirección contraria, antes de detenerse de nuevo para moverse una vez más en la otra dirección. Esto sería un movimiento retrógrado real, no una ilusión óptica originada por la diferencia de velocidades orbitales alrededor del Sol.

Esta primera respuesta a los complicados movimientos de los planetas y del Sol con relación a la Tierra muestra la dificultad en llegar

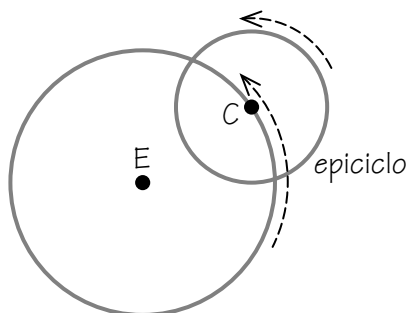


FIGURA 1.8. Epiciclos. Un planeta, P, se mueve en un círculo pequeño, el epiciclo, cuyo centro, C, sigue una órbita circular más grande.

a una descripción correcta del universo partiendo únicamente de las observaciones o de un principio filosófico muy general. Si los seguidores de Aristóteles hubiesen sido más críticos, habrían tenido que lidiar con unos cuantos problemas incómodos. ¿Por qué la Tierra no es perfectamente esférica? ¿Por qué la posición central de la Tierra se consideraba tan importante, mientras que podía haber otros movimientos circulares en epiciclos que no estaban centrados en la Tierra? ¿Por qué se aceptaba la idea de desplazar el centro del círculo deferente de cada planeta fuera de la Tierra? Quizá fuera un desplazamiento pequeño, pero la Tierra está en el centro del universo o no lo está.

Revoluciones copernicanas

Si Dios Todopoderoso me hubiese consultado antes de embarcarse en la Creación, le hubiese recomendado algo más simple.

Alfonso X el Sabio, rey de Castilla²¹

El modelo ptolemaico del universo, con la Tierra en el centro, era una compleja concepción del hombre. No era correcto, pero se podía ajustar de tantas maneras para adaptarlo a las nuevas observaciones sobre movimientos planetarios que sobrevivió, básicamente sin mo-

dificaciones, hasta el siglo xv. Esta elasticidad hizo incluso que la palabra «epiciclo» se utilizase en modo peyorativo para referirse a cualquier teoría científica escurridiza o excesivamente complicada. Si se tienen que añadir continuamente detalles al funcionamiento de una teoría para explicar cada nuevo dato que aparece, significa que la teoría tiene poco poder de explicación. Es como tener una nueva teoría sobre coches que predice que todos los coches son rojos. El lunes por la mañana, al salir de casa, te tropiezas con un coche negro, de modo que modificas la teoría para predecir que todos los coches son rojos, salvo los lunes por la mañana, en que algunos son negros. Ves pasar muchos coches rojos y negros y todo parece correcto. Pero entonces, por la tarde, ves pasar un coche verde. De acuerdo, todos los coches son rojos y negros los lunes, salvo que, después del mediodía, algunos coches son verdes. Ya se puede ver hacia dónde nos dirigimos. Esta teoría sobre coches tiene una serie de «epiciclos» correctores. Cada nuevo dato se adapta mediante una ligera modificación con el objetivo de mantener la grandiosa hipótesis inicial. En algún momento, lo que se debe hacer es dar el mensaje por recibido y empezar de nuevo.

Por supuesto, este ejemplo es exagerado. La teoría de Ptolomeo era más sofisticada. Cada vez que se agregaba un epiciclo se introducía una nueva corrección más pequeña para adaptarse al mayor detalle a las observaciones de los movimientos. Esta teoría fue uno de los primeros ejemplos en acción de un proceso de aproximación por convergencia. Cada adición al modelo es menor que la anterior y genera una mejor descripción de las observaciones.²² Funcionaba bastante bien a casi todos los efectos, a pesar de que se basaba en una imagen global errónea del sistema solar y de que en su centro tenía el astro equivocado (la Tierra en lugar del Sol). Hubo que ser muy persuasivo para hacer cambiar las opiniones en contra de él.

Se suele considerar a Nicolás Copérnico un revolucionario, el científico que destronó a la humanidad de su posición central en el universo. La realidad ha resultado ser más compleja y mucho menos espectacular y, si es que realmente fue un revolucionario, desde luego lo fue a pesar suyo.²³ El gran libro de Copérnico, *De revolutionibus orbium coelestium* («Acerca de las revoluciones de las esferas celestes») se

entregó a los impresores en 1543, poco antes de su muerte, y su impacto fue débil. No se imprimieron muchas copias, y pocas de estas fueron siquiera leídas. Sin embargo, con el tiempo, la perspectiva de Copérnico se convirtió en el punto de partida de la transformación de nuestra visión del universo, y acabaría por desplazar la antigua imagen ptolemaica de un sistema planetario con la Tierra en el centro para pasar a un modelo centrado en el Sol, que es el que seguimos teniendo.²⁴

Los avances en la tecnología de impresión durante el siglo xvi hicieron que se pudiese imprimir el libro de Copérnico con diagramas en los puntos del texto en que se comentaban. El más famoso de estos diagramas (véase la Figura 1.9) muestra un modelo simple del sistema solar con el Sol ubicado en su centro. El círculo más externo marca la frontera de la «esfera inmóvil de las estrellas fijas», más allá de nuestro sistema solar. Cada uno de los otros seis círculos indica una esfera de movimiento para las órbitas de los seis planetas conocidos en aquel momento. De fuera adentro, corresponden a los planetas Saturno, Júpiter, Marte, la Tierra (con la Luna creciente al lado), Venus y Mercurio, respectivamente. Todos ellos siguen trayectorias circulares alrededor del Sol, situado en posición central. Se creía que la Luna se movía en un círculo alrededor de la Tierra.

Los sistemas de Copérnico y Ptolomeo no eran los únicos panoramas del Sol y los planetas durante los siglos xvi y xvii. La Figura 1.10, tomada del *Almagestum Novum* («El nuevo Almagesto»),²⁵ publicado por Giovanni Riccioli en 1651, resume con precisión las imágenes del mundo que se ofrecían a los astrónomos en la época postcopernicana. En ella se muestran seis modelos distintos del sistema solar (etiquetados del I al VI).

El modelo I es el sistema ptolemaico, con la Tierra ubicada en el centro; el Sol gira a su alrededor en una órbita situada más allá de las de Mercurio y Venus.

El modelo II es el sistema platónico, en el que la Tierra ocupa también la posición central. El Sol y los demás planetas orbitan a su alrededor, pero el Sol está por dentro de las órbitas de Mercurio y Venus.

El modelo III se denomina también sistema egipcio; en él, Mercu-

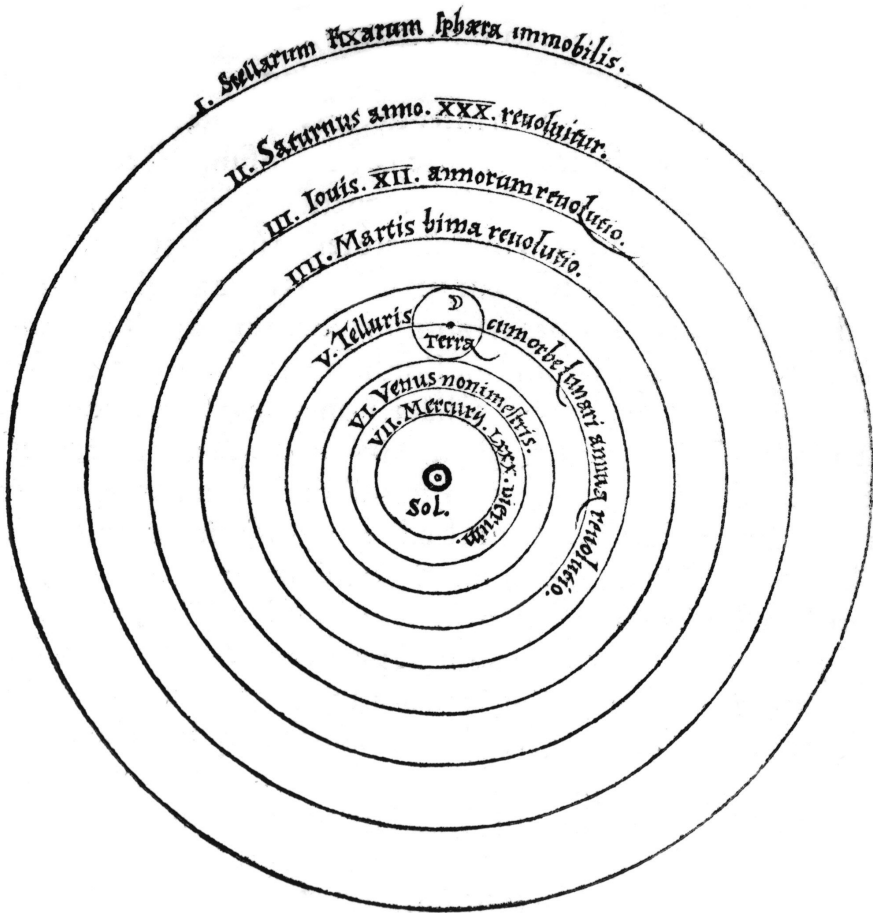


FIGURA 1.9. La imagen heliocéntrica del sistema solar de Copérnico, publicada en 1543. El diagrama está etiquetado en latín, y en él se muestran esferas concéntricas alrededor del Sol en posición central. La esfera exterior fija de las estrellas (I) rodea a las esferas en rotación (II-VII) que contienen las órbitas de Saturno, Júpiter, Marte, la Tierra (con su Luna en cuarto creciente), Venus y Mercurio.

rio y Venus giran alrededor del Sol, el cual, junto con los planetas exteriores, gira alrededor de la Tierra.

El modelo IV es el sistema ticonico del gran astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601), en el que la Tierra está fija en el centro y la Luna y el Sol giran a su alrededor, pero el resto de planetas gira alre-

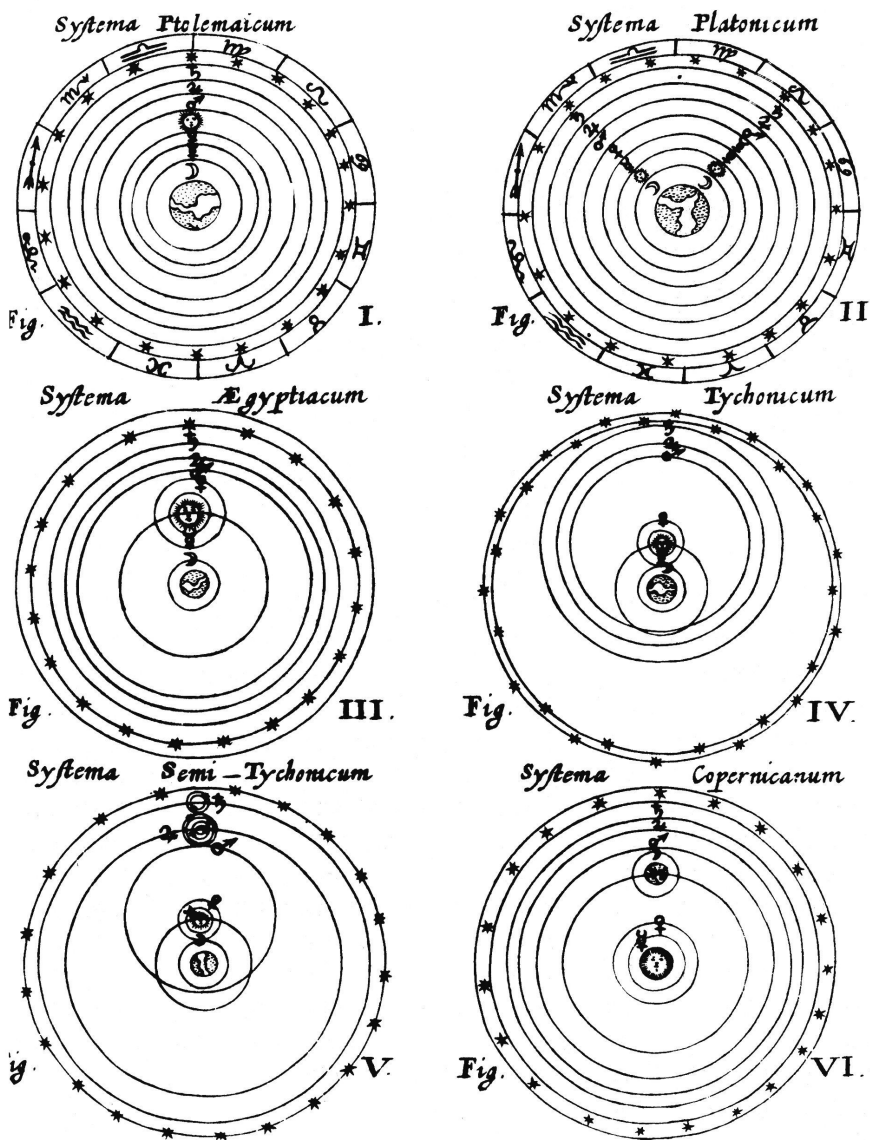


FIGURA 1.10. Los seis principales sistemas del mundo en 1651, presentados por Giovanni Riccioli en su libro *El nuevo Almagesto*.

dedor del Sol. Las órbitas de Mercurio y Venus están, por tanto, parcialmente entre la Tierra y el Sol, mientras que las de Marte, Júpiter y Saturno rodean tanto a la Tierra como al Sol.

El modelo V, denominado sistema semiticónico, lo inventó el propio Giovanni Riccioli. En su modelo, los planetas Marte, Venus y Mercurio orbitan alrededor del Sol, que a su vez, junto con Júpiter y Saturno, orbita la Tierra. Riccioli quería distinguir Júpiter y Saturno de Mercurio, Venus y Marte porque se sabía que tenían lunas, como la Tierra (aún no se habían descubierto las dos lunas de Marte), de manera que sus órbitas debían de estar centradas en la Tierra, no en el Sol.

El modelo VI es el modelo copernicano que hemos visto ilustrado en la Figura 1.9.

Esta selección de antiguas visiones astronómicas del universo nos ha enseñado varias lecciones simples. No es fácil comprender el universo si uno se limita a mirarlo. Estamos confinados a la superficie de un tipo específico de planeta que orbita, junto con otros, alrededor de una estrella de mediana edad. Así, lo que vemos en el cielo nocturno está fuertemente influenciado por nuestra posición en la superficie de la Tierra, el momento en que observamos y las ideas preconcebidas que podamos tener acerca de dónde deberíamos estar en el esquema global de las cosas. Nuestra visión del mundo predetermina nuestro modelo del mundo.

A medida que nuestra visión del universo se ampliaba, también crecían estos problemas. Para avanzar necesitamos poder describir y predecir los movimientos celestes que vemos en nuestra parte del universo. Pero, en última instancia, queremos saber cómo es el universo entero. Los primeros pasos decisivos en esa dirección los tomaron los astrónomos del siglo XVIII. Vamos a seguirlos.

