

---

## Introducción

El término «cosmología» deriva del griego, y en esencia significa el conocimiento racional o científico del «cosmos», una palabra que para los antiguos griegos llevaba connotaciones tales como «orden», «comportamiento regular» y «belleza» (no es casual que las palabras «cosmología» y «cosmetología», o «cosmos» y «cosmética», sean tan parecidas). La ambiciosa afirmación de que el universo puede describirse de manera racional —es decir, que es un cosmos, no un caos— tuvo su origen en la filosofía natural de la antigua Grecia, que en consecuencia debe ocupar un lugar central en cualquier historia general de la cosmología. Aunque en el Capítulo 1 hago una breve referencia a las ideas cosmológicas de las culturas no occidentales, el presente libro se interesa en el desarrollo de la comprensión científica del universo, lo que en la práctica significa que es una contribución a la historia de la ciencia en la tradición cultural europea. Dicho sea de paso, aunque los intentos por entender el universo en términos científicos se remontan al propio nacimiento de la ciencia, antes del siglo xx la palabra «cosmología» era raramente utilizada en un contexto científico. Los primeros libros que llevaban la palabra en sus títulos datan de la tercera década del siglo xviii. Como quedará claro, la cosmología no tuvo una identidad profesional hasta pasada la segunda guerra mundial. Estrictamente hablando, no había «cosmología» antes de esa época, sólo científicos que ocasionalmente trabajaban en cuestiones de naturaleza

cosmológica. Aunque es algo anacrónico llamar «cosmólogos» a dichos científicos, es una etiqueta conveniente y no he hecho ningún esfuerzo especial por evitarla.

El ámbito de la cosmología es un concepto sobrecogedor, el universo o el cosmos en el sentido de todo lo que tiene (o ha tenido, o tendrá) una existencia física, ya sea materia, energía, espacio o tiempo. Utilizo las dos palabras «cosmos» y «universo» como sinónimas, y tampoco las distingo de la palabra «mundo». En las lenguas alemana y escandinava este concepto global se conoce a veces como el «todo»; véase el alemán *Weltall*. La cosmología en sentido tradicional se refiere principalmente al estudio de la estructura del universo, lo que en el siglo xvii se solía conocer como «cosmografía», un término que pone el acento en la cartografía del cosmos y que también podía referirse a lo que hoy consideraríamos como geografía. De hecho, cuando la famosa obra geográfica de Ptolomeo (la *Geographia*) fue traducida al latín por primera vez en 1406, llevaba por título *Cosmographia*. Mientras que cosmología y cosmografía eran ciencias que trataban de un mundo estático, cosmografía significa literalmente el estudio de cómo el universo llegó a ser lo que es y por ello incluye una dimensión temporal. Sin embargo, el término ya no es muy utilizado, y hoy los aspectos evolutivos del universo, incluida su denominada creación, se incluyen bajo la etiqueta «cosmología».

De forma algo equívoca, cosmogonía y cosmografía solían referirse al sistema planetario (su formación y su descripción, respectivamente) más que al universo en conjunto, como se ejemplifica en la *Cosmographia* de Pedro Apiano de 1524 y las *Hypothèses cosmogoniques* de Henri Poincaré de 1913. Ninguna de estas dos obras trataba de cosmología, en el sentido actual del término. Cosmofísica puede estar más cerca, pero éste era originalmente un nombre utilizado para una mezcla de astrofísica, meteorología y geofísica, con poco interés por el universo en general. El término quizá haya sido utilizado por primera vez por el alemán Johannes Müller, el autor de *Lehrbuch der kosmischen Physik* (1856), y en 1903 el químico sueco Svante Arrhenius publicó una extensa obra en dos volúmenes con el mismo título. Ni Müller ni Arrhenius tenían mucho que decir sobre cosmología física tal como hoy entendemos la materia.

Habría que señalar, además, que la palabra «cosmología» se utiliza a veces con un sentido muy diferente del estudio científico del universo. Por ejemplo, se puede hablar de cosmología comunista, cosmología romántica, o la cosmología de los aborígenes australianos, en cuyo caso uno se refiere a la visión del mundo del grupo o época correspondiente (en alemán *Weltanschauung* antes que *Weltbild*). Las visiones del mundo de individuos, períodos o sociedades pueden estar relacionadas con el significado más estrecho y de orientación astronómica de cosmología, pero ése no es el caso general. Por ejemplo, el filósofo Stephen Toulmin publicó en 1982 un libro con el título *The Return to Cosmology*, un análisis de destacados «cosmólogos» intelectuales tales como Arthur Koestler, Teilhard de Chardin y Jacques Monod, ninguno de los cuales ha contribuido al estudio del universo físico. Análogamente, el hecho de que *Process and Reality* de Alfred Whitehead de 1929 llevara el subtítulo *An Essay in Cosmology*, no lo hace relevante para los astrónomos y físicos que tratan de entender el mundo. Tampoco es el caso de *Un Nuevo Modelo del universo* del filósofo ruso Peter D. Ouspensky, publicado por primera vez en 1914.

En una perspectiva histórica más amplia, la cosmología como una visión del mundo o una ideología no puede separarse claramente de la cosmología como una ciencia. De hecho, la segunda creció básicamente a partir de la primera, y en consecuencia el historiador tiene que tratar con ambas. Incluso cuando se centra en los aspectos científicos de la cosmología, como yo lo hago, uno no puede ignorar las dimensiones filosófica y religiosa que durante largo tiempo estuvieron inextricablemente relacionadas con los esfuerzos de los científicos por desvelar los secretos del universo. Esta relación era particularmente fuerte en los viejos tiempos, especialmente antes del período de la Ilustración, después del cual se debilitó. Sin embargo, nunca desapareció por completo y probablemente nunca lo hará. (Quienes creen que la cosmología ha cortado en nuestros días sus lazos con la filosofía y la religión deberían considerar el principio antrópico y la denominada escatología física, temas que serán discutidos en la sección «El principio antrópico y otras especulaciones»).

Desde un punto de vista epistemológico y sociológico, la cosmología es una ciencia peculiar, distinta de cualquier otra. Tradicionalmente

los historiadores han investigado su desarrollo bien desde la perspectiva de la historia de las ideas y de la cultura o bien como parte de la historia de la astronomía. Ciertamente hay un fuerte vínculo entre astronomía y cosmología, pero en mi opinión sería un error considerar la cosmología meramente como un subcampo de las ciencias astronómicas. No es así hoy, y no fue así en el pasado. De hecho, durante largos períodos de tiempo los astrónomos trataban de evitar cuestiones de cosmología y cosmogonía, campos que con mucho gusto dejaban a los filósofos. Mi intención ha sido escribir una historia de cómo los científicos —o, hasta muy recientemente, los filósofos naturales— exploraban y pensaban el universo y de cómo ellos, en este proceso, cambiaron su propio significado. Los astrónomos desempeñaron siempre un papel muy importante en este desarrollo, pero no estaban solos. Contrariamente a la mayoría de las demás historias de la cosmología, yo presto gran atención a los razonamientos basados en la física y la química. La modelización matemática comparada con las observaciones astronómicas ha sido quizá la aproximación particular más importante al estudio del universo, pero siempre ha habido personas que consideraban los cielos en términos materiales, como algo que químicos y físicos podían investigar. Hay una creencia extendida en que la «cosmología física» es una invención de la segunda mitad del siglo XX, algo sólo hecho posible por el descubrimiento en 1965 del fondo cósmico de microondas, pero yo creo que esta opinión es contradicha por la historia.

No hay una manera definida de escribir la historia de la cosmología, como no hay una manera de escribir la historia de cualquier otro campo de la ciencia (o rama de la historia en general). Yo he decidido presentar la evolución de una manera muy general, incluyendo perspectivas físicas y filosóficas junto con las inevitables perspectivas astronómicas. En lo que concierne a la cosmología, yo destaco el siglo XX, al que dedico tanto espacio como a toda la evolución anterior. Creo que esto está justificado por al menos dos razones. Para empezar, la historia de la cosmología previa al siglo XX está bien cubierta en la literatura existente. Por otra parte, y más importante, la cosmología científica ha cambiado drásticamente desde los primeros años del siglo XX (más exactamente, desde 1917), cuando se inició una nueva y revolucionaria etapa en el secular estudio del universo. El desarrollo

tras la aportación fundamental de Einstein durante la primera guerra mundial, y más incluso a partir de los años sesenta, ha sido tan notable —y tan sumariamente cubierto por los historiadores— que es necesario darle una alta prioridad. No hace falta decir que ésta no es tarea fácil y que indudablemente mi exposición puede ser criticada. Resulta especialmente difícil cubrir los desarrollos recientes, no sólo porque han sido muy diversos y confusos, sino también porque es difícil juzgar su importancia histórica. Pero, en cualquier caso, éste es un problema general para cualquier tipo de historiografía reciente.<sup>1</sup> Pienso que una exposición histórica algo inadecuada y objetable de la cosmología moderna es mejor que nada. Se necesitó tiempo para que los historiadores de la ciencia descubrieran la inmensa riqueza de la cosmología moderna, y confío en que este libro pueda ser una modesta contribución para cambiar el estado de cosas.

La estructura del libro está organizada básicamente de forma cronológica. Las primeras visiones cosmológicas que conocemos, las de las culturas mesopotámica y egipcia, eran cosmogonías antes que cosmografías. Eran historias míticas de cómo nacieron el mundo y los dioses, a los que seguirían los primeros humanos. Esto se trata en el Capítulo 1, que procede a considerar el cosmos griego, empezando por su versión filosófica especulativa, luego desarrollada en un modelo científico por Eudoxo, Aristóteles, Hiparco, Ptolomeo y otros. La imagen aristotélica-ptolemaica del mundo, en su versión cristianizada, fue adoptada por los filósofos-teólogos de la Edad Media, que la convirtieron no sólo en el pilar del conocimiento sino también de la fe. La imagen estable del mundo medieval fue, no obstante, desafiada por el sistema heliocéntrico copernicano en 1543, una innovación que anunciaba la llegada de una nueva era. El universo copernicano era inmensamente mayor que el universo tradicional, pero pese a todo los dos sistemas del mundo rivales tenían mucho en común, incluida su concepción compartida del sistema solar como una enorme concha esférica poblada por incontables estrellas. Además, ambos sistemas suponían que el universo tenía un centro y que los cuerpos celestes se movían uniformemente en círculos, una visión que fue finalmente abandonada un par de décadas después de que Kepler introdujera las elipses como las verdaderas órbitas planetarias.

El Capítulo 2 describe algunos de los avances en el conocimiento astronómico y cosmológico desde Newton en la penúltima década del siglo xvii a Hubble en la tercera década del siglo xx, un largo período durante el cual los progresos fueron debidos a observaciones astronómicas antes que a innovaciones teóricas. La ley de gravitación universal de Newton se convirtió en la piedra angular de la astronomía teórica y la base de las primeras cosmogonías científicas (o de apariencia científica) en el estilo grandioso de Kant y Lambert. En la segunda mitad del siglo xviii hizo su entrada en cosmología una perspectiva evolutiva, una tendencia que continuó en la visión del mundo nebuloso del siglo siguiente. Hasta entonces la teología había sido parte de la tradición cosmológica, pero desde 1820 aproximadamente se hace raro encontrar referencias a Dios en obras científicas sobre el cosmos.

La invención de la espectroscopia en 1860 introdujo por primera vez una dimensión física (y química) en la cosmología, que ofrecía nuevas y fructíferas maneras de tratar el enigma de las nebulosas. Simultáneamente, las leyes de la termodinámica se utilizaron para discutir el desarrollo a largo plazo del universo, su destino en el futuro lejano y su posible origen en un pasado desconocido. Estas discusiones de una naturaleza más especulativa no fueron de gran interés para los astrónomos, que preferían utilizar sus telescopios para obtener un conocimiento positivo sobre el universo en su estado presente. Para el cambio de siglo, una de las grandes preguntas concernía al tamaño de la Vía Láctea y la distribución de las nebulosas. Estos difíciles problemas, resumidos en el «Gran Debate» de 1920, fueron resueltos cuando se hizo posible determinar las distancias a algunas de las nebulosas. Resultó que estaban a enormes distancias, como universos isla que flotaban majestuosamente en un vasto mar de espacio.

El trabajo realizado por los astrónomos observacionales fue de poca relevancia para el desarrollo de la teoría de la relatividad general de Einstein y su posterior transformación en una teoría de un universo cerrado. Como hoy podemos ver, pero estaba lejos de ser obvio en esa época, la obra de Einstein marcó una divisoria en la historia de la cosmología, fácilmente comparable a la revolución copernicana. La parte principal de los Capítulos 3 y 4 trata aspectos de las sorprendentes

consecuencias de las ecuaciones de campo cosmológicas de Einstein. La naturaleza estática del universo tenía un estatus de paradigma en la primitiva cosmología relativista, hasta el punto de que las primeras teorías de un universo en evolución fueron ignoradas. Sólo en 1930, cuando las observaciones de Hubble se combinaron con las intuiciones teóricas de Friedmann y Lemaître, el universo en expansión llegó a formar parte de la corriente principal de la cosmología. Podemos estar tentados a identificar la expansión del universo con la cosmología relativista, y también a pensar que llevó automáticamente a la noción de un universo de edad finita, pero la historia muestra lo contrario. Los cosmólogos podían preferir un universo con un origen en el tiempo sin apuntarse a la relatividad general; y los que estaban a favor de la teoría relativista del universo en expansión podían negar que tuviera una edad definida.

La emergencia y desarrollo de la teoría Big Bang del universo, desde mediados de los años cuarenta a finales de los setenta, forma la parte principal del Capítulo 4. A principios de los años cincuenta, Gamow y sus colaboradores habían elaborado un sofisticado modelo del universo primitivo basado en física nuclear, la primera versión de la cosmología de Big Bang caliente. La teoría llegó a un punto muerto, no obstante, y pasó más de una década antes de que tuviera nuevos desarrollos y llegara a ser ampliamente aceptada. Una razón importante para el desarrollo no lineal de la cosmología en este período fue la emergencia de una fuerte teoría rival del universo en la forma de la cosmología de estado-estacionario de Bondi, Hoyle y Gold. La controversia entre esta teoría y las teorías evolutivas relativistas es un caso clásico en la historia de la cosmología, descrito con más detalle en mi *Cosmology and Controversy* de 1996. Nuevas observaciones, en particular el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo de microondas en 1965, acabaron con la teoría del estado-estacionario, que para 1970 ya no era considerada una alternativa seria por la mayoría de los astrónomos y físicos. La teoría del Big Bang caliente se convirtió rápidamente en el paradigma de la nueva cosmología, un campo que por primera vez emergía como una disciplina científica con sus propios cánones y reglas para resolver problemas. En resumen, la cosmología se convirtió en una profesión científica.

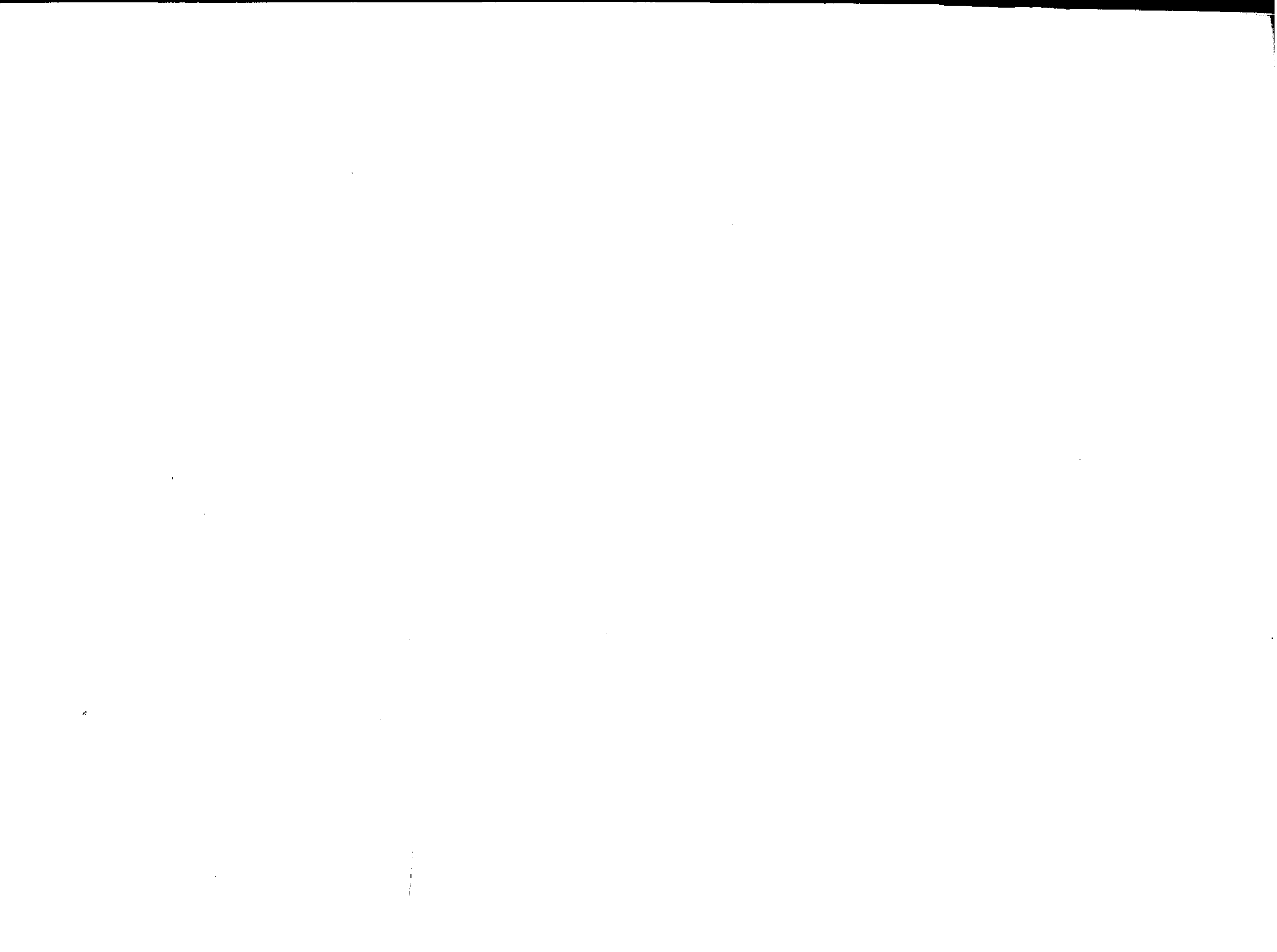
El Capítulo 5 resume los desarrollos más importantes desde aproximadamente 1980. Por el lado teórico, el escenario inflacionario del universo muy primitivo llevó a una revolución menor que reforzó aún más los fuertes vínculos entre la física de partículas y la cosmología del universo primitivo. Más importante incluso fue que el modelo Big Bang estándar de los años setenta empezó a perder su estatus a medida que las observaciones indicaban que el universo estaba en un estado de expansión acelerada. Se creía por razones teóricas que la densidad de masa-energía era crítica, pero, incluso cuando se tenían en cuenta las grandes cantidades de hipotética materia oscura, eso no era suficiente. A finales del milenio muchos cosmólogos creían que la mayor parte del universo consistía en «energía oscura», que posiblemente era una forma de energía de vacío cuántico. Y lo que es más notable, la controvertida constante cosmológica de Einstein hacía así un espectacular regreso al escenario cosmológico. Los progresos en cosmología durante el último par de décadas han estado impulsados principalmente por la observación, pero al mismo tiempo ha florecido el interés en áreas de la cosmología muy técnicas y en parte especulativas. En los apartados finales ofrezco una caracterización de algunas de las áreas más especulativas que, cualesquiera que sean sus méritos científicos, han atraído mucho al público. Han ayudado a hacer de la cosmología moderna una ciencia de moda mucho más allá del mundo de los cosmólogos investigadores.

No hace falta decir que el libro no cubre por completo el desarrollo de la cosmología. Hay muchos nombres, sucesos y temas que no están incluidos, y otros que sólo están mencionados de una forma demasiado breve. Al final del libro abordo unos pocos temas que son mejor tratados desde una perspectiva amplia y no cosmológica, tales como la importancia de las innovaciones tecnológicas para el progreso del conocimiento cosmológico. También comento varias cuestiones de naturaleza más filosófica, no para «filosofar» sobre cosmología sino porque han sido temas recurrentes en el desarrollo histórico de la cosmología. En 1996, después de haber estado dedicado treinta años a la cosmología, Stephen Hawking escribía:

La cosmología solía ser considerada una pseudociencia y campo reservado para físicos que podrían haber hecho un trabajo útil en sus años

anteriores pero habían caído en el misticismo en su vejez... Sin embargo, en años recientes el alcance y calidad de las observaciones cosmológicas han mejorado enormemente con los desarrollos en la tecnología. De modo que esta objeción a considerar la cosmología como una ciencia, que no tiene una base observacional, ya no es válida.<sup>2</sup>

Hawking tenía razón en la última parte —las observaciones de relevancia cosmológica han mejorado enormemente—, pero su apreciación revela una comprensión inadecuada de la historia de la cosmología, por decirlo suavemente. Como muestra este libro, la cosmología como ciencia se remonta a mucho más atrás en el tiempo que los «años recientes» de los que hablaba Hawking. Yo no veo ninguna razón por la que la cosmología de Aristóteles, o la de investigadores posteriores como Copérnico, Newton, William Herschel y Hugo von Seeliger, no sea «científica». Por supuesto, sus cosmologías no eran muy científicas para nuestros cánones, pero entonces, ¿cómo mirarán los cosmólogos de dentro de quinientos años la actual teoría relativista del Big Bang del universo?



tíficos y filósofos naturales raramente abordaban cuestiones concernientes al origen del universo o cómo había evolucionado hasta su estado actual. De Aristóteles en adelante, la mayoría de los astrónomos suponían tácitamente que el mundo había existido siempre y que seguiría haciéndolo en un futuro indefinido. Por supuesto, si se aceptaba esta hipótesis no había lugar para la cosmogonía. El segundo punto que quiero mencionar es que el significado de «el universo» (o «cosmos») cambió. Seguía siendo la totalidad de las cosas físicas en el mundo, pero en la práctica astronómica el universo tendía a identificarse con los siete planetas que giraban en torno a la Tierra. Aunque las estrellas fijas también pertenecían al universo, los astrónomos no podían hacer mucho con ellas excepto contarlas y clasificarlas. (La primera clasificación en magnitudes fue debida a Hiparco, que dividió las estrellas en seis clases, con las más luminosas en la magnitud 1 y las menos luminosas en la magnitud 6.) La visión más estrecha y el énfasis en modelos matemáticos significaba que la cosmología quedaba en la periferia del programa de investigación de los astrónomos, un estado de cosas que iba a continuar a lo largo de la Edad Media y el Renacimiento.

Esto no quiere decir que la cosmología desapareciera del escenario de la ciencia griega, sino sólo que se le daba poca prioridad y, cuando era cultivada, aparecía en formas diferentes de las anteriores. Entre las teorías cosmológicas más interesantes en ese período estaban las de Aristóteles, Aristarco y Ptolomeo. La mayoría de los astrónomos preferían dejar la cosmología a los filósofos, y en éstos sí encontramos un interés en el tema siguiendo líneas similares a las de los presocráticos. Los estoicos, por ejemplo, estaban muy interesados en cuestiones cosmológicas, pero no las combinaban en modo alguno con el conocimiento astronómico. Por mencionar tan sólo un aspecto de la cosmología estoica, ellos sostenían una visión del mundo cíclica en la que la formación y destrucción del cosmos estaba asociada con fenómenos térmicos. El mundo era una esfera gigantesca que oscilaba pasando por ciclos de expansión y contracción en el vacío que le rodeaba. Críspio, un líder de la escuela estoica en Atenas en el siglo III a.C., creía que «después de la conflagración del cosmos todo volverá a estar en orden numérico, hasta que toda cualidad específica vuelva también

a su estado original, igual que estaba antes y llegó a ser en dicho cosmos».<sup>18</sup>

### *La imagen del mundo de Aristóteles*

Aunque Platón discutía cuestiones astronómicas en varios de sus escritos, su actitud era idealista en el sentido de que negaba el valor epistemológico de las observaciones. El cosmos podía comprenderse matemáticamente, por el puro pensamiento, mientras que las investigaciones empíricas sólo oscurecerían la verdad; como mucho llevarían a una «historia probable» del mundo real. En la *República* él insistía en que la astronomía debería seguirse como si fuera geometría. «Prescindiremos de los cielos estrellados, si nos proponemos obtener un conocimiento real de la astronomía», escribió.

En cualquier caso, según la tradición Platón fue el primero en enunciar el que pronto iba a convertirse en el problema básico de la astronomía y una aproximación a esta ciencia de enorme importancia. Según el *Comentario sobre el De caelo de Aristóteles*, de Simplicio, una obra escrita a comienzos del siglo VI d.C., Platón sugería que la tarea de los astrónomos consistía en reducir los movimientos aparentes de los planetas (incluidos el Sol y la Luna) a movimientos circulares uniformes: «salvar los fenómenos». Hoy se piensa que la exigencia de uniformidad y circularidad de los movimientos celestes fue una innovación posterior, que no puede encontrarse en Platón y que él no subscribía.<sup>19</sup> El principio iba a conformar el paradigma que dominaría la astronomía y la cosmología durante un período de unos mil años, hasta la época de Kepler. Cualquiera que fuese la prioridad de Platón, fue un discípulo suyo quien respondió por primera vez al desafío, es decir, quien propuso por primera vez un único sistema que daba cuenta de los movimientos observados de los planetas en términos de órbitas circulares.

Eudoxo de Cnido pasó algún tiempo en la Academia de Platón en Atenas; más tarde construyó un sistema de esferas concéntricas rotatorias que daba cuenta de muchas de las características observadas de los cielos.<sup>20</sup> No ha sobrevivido ninguno de los escritos de Eudoxo, pero

el contenido básico de su modelo del mundo es conocido gracias a escritores posteriores, Aristóteles y Simplicio en particular.<sup>21</sup> Eudoxo consideraba cada uno de los cuerpos celestes como un punto en la superficie de una de varias esferas interconectadas, todas ellas concéntricas —u «homocéntricas»— con la Tierra en el centro. Él imaginaba que las esferas giraban alrededor de ejes diferentes y con velocidades diferentes, pero en conformidad con el paradigma de Platón sólo permitía revoluciones uniformes. En el caso de los cinco planetas, él utilizaba cuatro esferas, la más externa de las cuales representaba un movimiento alrededor de la Tierra con un período de 24 horas. En el caso del Sol y la Luna, él postulaba tres esferas.

Entre los movimientos irregulares que había que explicar estaba el hecho de que algunos de los planetas parecían invertir su movimiento, y luego, al cabo de cierto tiempo, continuaban su curso regular hacia el este. Semejante movimiento retrógrado se consideraba indigno de un cuerpo celeste y divino; por lo tanto, era algo que tenía que explicarse como una apariencia. Este modelo de Eudoxo conseguía hacerlo, aunque sólo de un modo cualitativo e incompleto, y también daba cuenta en general de otra irregularidad perturbadora, la variación en latitud de los planetas. Sin embargo, puesto que sólo había dos parámetros que podían variarse, uno correspondiente a las velocidades de revolución y otro a la inclinación de las esferas, el modelo era incapaz de dar los movimientos correctos de los planetas.

En su *Introducción a la Astronomía*, una obra de aproximadamente el año 70 a.C., el filósofo estoico Gemino daba una excelente exposición del programa de investigación adoptado por Eudoxo y sus seguidores. «Con respecto a los seres divinos y eternos, creían no era admisible suponer un desorden tal que dichos cuerpos se movieran ahora más rápidamente y luego más lentamente, o incluso se detuvieran, como en lo que se llaman las estaciones de los planetas.» Es interesante que Gemino trazara una analogía con las normas sociales de su época:

Incluso en la esfera humana tal irregularidad es incompatible con el proceder ordenado de un caballero. E incluso si las necesidades crudas de la vida a menudo imponen a los hombres ocasiones de precipitación y

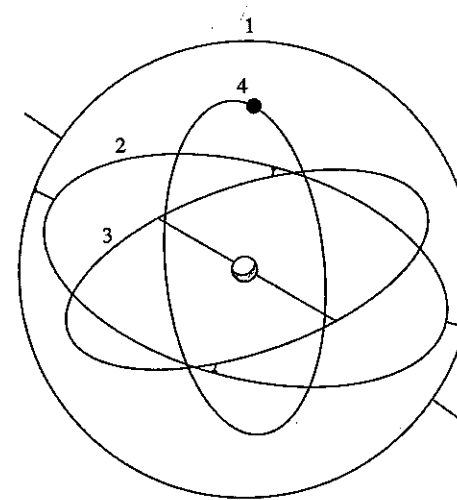


Fig. 1.5 Mecanismo planetario basado en el modelo de Eudoxo con cuatro esferas concéntricas.

relajamiento, no hay que suponer que tales ocasiones son propias de la naturaleza incorruptible de las estrellas [planetas]. Por esta razón, ellos definían su problema como la explicación de los fenómenos sobre la hipótesis de movimiento circular y uniforme.<sup>22</sup>

En un comentario sobre Aristóteles, Gemino, citado por Simplicio, exponía la diferencia entre física y astronomía, tal como estas disciplinas eran concebidas en la antigüedad griega:

Es tarea de la indagación física considerar la sustancia de los cielos y las estrellas, su fuerza y cualidad, su nacimiento y su destrucción; más aún, está en posición incluso de probar los hechos sobre su tamaño, forma y disposición. La astronomía, por el contrario, no pretende hablar de nada de este tipo, sino que prueba la disposición de los cuerpos celestes por consideraciones basadas en la idea de que el cielo es un [kosmos] real, y además, nos habla de las formas, tamaños y distancias de la Tierra, el Sol, la Luna, y de eclipses y conjunciones de las estrellas, así como de la cualidad y extensión de sus movimientos.<sup>23</sup>

Esta distinción se mantendría durante aproximadamente dieciocho siglos y tiene un impacto crucial en las historias de la astronomía y la cosmología. Mientras Eudoxo necesitaba 26 esferas para dar cuenta de



la marcha de los cielos, Calipo de Cyzicus, casi contemporáneo de Aristóteles, refinó el modelo añadiendo siete esferas más (una para Venus, Marte y Mercurio, y dos para el Sol y la Luna). Parece que Eudoxo y Calipo concebían sus modelos del mundo de un modo puramente geométrico y las esferas celestes eran entidades meramente teóricas.

El modelo homocéntrico adoptado por Aristóteles era una modificación de los modelos de Eudoxo y Calipo, pero al mismo tiempo marcó un cambio importante en el programa de investigación pues Aristóteles introdujo una perspectiva física. Sus esferas eran corpóreas, no construcciones matemáticas, y sus planetas y estrellas eran cuerpos físicos unidos a un conjunto de capas rotatorias interconectadas. Esto le hizo proponer un mecanismo para explicar por qué los cuerpos se movían como lo hacían. Según Aristóteles, las esferas de un planeta exterior estaban conectadas físicamente con las de un planeta interior, un modelo que le obligaba a introducir algunas contramedidas para reproducir los movimientos observados. En su *Metafísica* escribió: «Si todas las esferas combinadas deben dar cuenta de los fenómenos, entonces para cada planeta debe haber otras esferas... que contrarresten a las anteriores y restauren en su posición original la primera esfera del planeta más interior, pues sólo de esta manera el sistema general produce el movimiento requerido de los planetas».<sup>24</sup> La fisicalización del cosmos de Aristóteles se hacía a costa de un drástico incremento en la complejidad: ahora se necesitaban no menos de 55 esferas, 22 de ellas introducidas para restaurar la independencia de los siete sistemas planetarios.

La gran innovación de Aristóteles consistió en ofrecer un modelo físico de los cielos reales en acuerdo no sólo con el postulado de movimiento circular uniforme sino también con los principios generales de su filosofía natural. Esta conexión era un tema destacado en su famoso tratado sobre los cielos, conocido por su título latino *De caelo*. Quizá la característica más importante en el cosmos de Aristóteles sea que era un universo de dos regiones, pues él trazaba una abrupta distinción entre el mundo sublunar y el supralunar. La primera región, que abarcaba la Tierra y el aire hasta la Luna, estaba compuesta de cuerpos formados por los cuatro elementos de Empédocles con sus mo-

vimientos naturales, que eran rectilíneos, bien hacia el centro de la Tierra (tierra y agua) o bien hacia fuera (aire y fuego). Más allá de la Luna, los cuerpos celestes se movían de forma natural en movimientos circulares uniformes y eternos, sin estar sometidos a las leyes de la física terrestre. Las estrellas, los planetas y los cuerpos celestes estaban compuestos de un tipo de materia completamente diferentes, una sustancia etérea y divina o quinto elemento, la *quinta essentia*. A diferencia de la materia del mundo sublunar, el éter celeste era puro e incorruptible. Un vacío no podía existir, ya fuera en el mundo sublunar o en el supralunar, y por lo tanto el universo era un *plenum*.

El universo de Aristóteles gozó de un respeto general en el mundo antiguo, pero no estuvo exento de críticas. Xenarco de Seleucia, que era contemporáneo de Cicerón, escribió un tratado titulado *Contra la Quinta Sustancia*, en el que desafiaba dos de las nociones básicas de Aristóteles: la existencia de un quinto elemento y el movimiento circular de los cuerpos celestes. Uno de sus argumentos contra el éter celeste era que la sustancia hipotética era superflua. Él negaba que un cuerpo simple o perfecto por su naturaleza siguiera una trayectoria circular, como afirmaban Aristóteles y muchos otros astrónomos. Pues, como argumentaba Xenarco, en el movimiento circular las partes más próximas al centro se mueven con una velocidad lineal menor que las más próximas a la periferia, mientras que un cuerpo simple debe necesariamente tener la propiedad de que todas sus partes se mueven con la misma velocidad.

Aunque Aristóteles sostenía que la Tierra estaba situada en el centro del universo, esto era sólo en un sentido geométrico. Contrariamente a los pitagóricos, él no veía razón para identificar el centro geométrico con el centro verdadero o «natural» del universo, entendido en un sentido físico y ontológico. Por el contrario, en el *De caelo* él sostenía que este estatus más elevado pertenecía a la esfera de las estrellas fijas, de donde se transmitía el movimiento a las partes interiores del mundo. Lo que contiene es más precioso que lo que es contenido, escribió. Así, se puede decir que Aristóteles operaba con dos centros de movimiento celeste, una idea que fue asumida en la concepción medieval del universo. No sólo era la esfera estelar de una naturaleza más noble que la de la Tierra corruptible, sino que también era el origen

del tiempo universal y estaba más cercana al primer motor inmóvil (correspondiente a Dios).

Basado como estaba en el modelo homocéntrico de Eudoxo, el sistema de Aristóteles compartía muchas de sus debilidades, la más seria de las cuales era su incapacidad para dar cuenta de las variaciones de brillo mostradas por algunos de los planetas. Era bien sabido que el brillo de Venus y Marte variaba considerablemente durante su carrera, lo que se explica fácilmente si su distancia a la Tierra cambia. Sin embargo, de las premisas del sistema homocéntrico se deducía que los planetas deben estar siempre a la misma distancia de la Tierra. Este y otros problemas fueron señalados por Autólico sólo una generación después de Eudoxo y, más tarde, también por Simplicio, que citaba a Sosígenes, un contemporáneo de Julio César. «Sin embargo las teorías de Eudoxo y sus seguidores no consiguen salvar los fenómenos», parece que dijo Sosígenes. La incapacidad de explicar el brillo variable fue la razón principal de que el modelo homocéntrico, ya fuera en la versión de Eudoxo o en la de Aristóteles, no sobreviviera mucho tiempo.

Aristóteles no sólo estableció un tipo de astronomía física; él estaba también muy interesado en las preguntas mayores de la cosmología. Una de estas preguntas se refería al aspecto temporal del mundo. ¿Había nacido alguna vez? ¿Tendría un final? En su famoso diálogo *Timeo*, Platón discutía estas cuestiones, aunque en una forma alejada de un discurso científico. Según Platón, el mundo fue creado. Él representaba la creación hecha por un «demiurgo», un artesano divino que hizo primero el alma del cosmos y posteriormente su cuerpo, ambos en ajuste perfecto. Además, Platón dejaba claro que sólo podía haber un mundo, no muchas imágenes del mundo ideal. Afirmaba que las estrellas y los planetas eran divinos y estaban en movimiento perpetuo, y «cualquier cosa que está en movimiento perpetuo es inmortal». La creación del mundo no fue *ex nihilo*, pues el demiurgo hizo el cosmos como una copia de un original divino y eterno, una especie de idea-universo preexistente.<sup>25</sup> Puesto que Platón formuló su historia de la creación como un mito, habría que tener cuidado en no leerla en ideas posteriores de creación cósmica, ya sea en un sentido teológico o científico. La mayoría de los intérpretes modernos advierten que el *Timeo* debería leerse metafórica antes que literalmente.

En cualquier caso, Aristóteles discrepaba de su antiguo maestro y negaba vehementemente que el universo fuera creado y también que fuera espacialmente infinito. Por el contrario, él argumentaba que el universo en conjunto era no generado y también indestructible; en resumen, eterno. Un mundo espacialmente infinito era imposible, pues por su propia naturaleza el mundo giraba en un círculo, y Aristóteles argumentaba que semejante movimiento era imposible para un cuerpo infinito pues ello llevaría a una velocidad infinita. Esta conclusión ya no sería cierta en un universo consistente en un cosmos material finito rodeado por un vacío infinito; pero tal imagen (que fue adoptada por algunos filósofos estoicos) iba contra la noción de Aristóteles del espacio como volumen lleno de materia. Según la filosofía natural aristotélica, un gran espacio vacío estaba descartado por definición. Lo que estaba encerrado por la esfera más externa incluía todas las cosas. En oposición a algunos filósofos anteriores, Aristóteles mantenía que el universo era único, eterno y omni-abarcador:

El mundo en su totalidad está hecho de la suma global de materia disponible ... y podemos concluir que no hay ahora una pluralidad de mundos, ni la ha habido ni podía haberla. Este mundo es uno, solitario y completo. Es evidente además que no hay ni lugar ni vacío ni tiempo más allá del cielo; pues (a) en todo lugar hay posibilidad de la presencia de un cuerpo, (b) el vacío se define como aquello que, aunque en el presente no contiene un cuerpo, puede contenerlo, (c) el tiempo es el número del movimiento; y sin un cuerpo natural no puede haber movimiento.<sup>26</sup>

En cuanto al cuerpo central, la Tierra, Aristóteles argumentaba que era esférico e inmóvil, ninguna de cuyas afirmaciones era controvertida. Aunque las esferas celestes se moverían de forma natural, Aristóteles introdujo en su *Física* un «motor no movido», un algo espiritual en la parte más exterior del universo que él concebía como la fuente última de todo movimiento celeste. Sin embargo, él no desarrolló el tema ni ofreció ninguna explicación de cómo tenía lugar la transmisión de movimiento. En su *De caelo*, Aristóteles se refería brevemente y de forma algo críptica a la cuestión de la rotación axial de la Tierra «como se establece en el *Timeo*». Este pasaje ha sido discutido ince-

santemente, desde Plutarco en la antigüedad, pasando por Tomás de Aquino en la Edad Media, hasta los estudiosos en el siglo xx. ¿Realmente suponía Platón una Tierra en rotación? Es casi seguro que no lo hacía, por otras razones, porque semejante noción habría sido completamente incompatible con su sistema astronómico. Platón compartía la visión estándar de la Tierra situada inmóvil en el centro del universo.

Las hipótesis de Aristóteles sobre un cosmos finito y eterno, y su negación de un vacío, no fueron generalmente aceptadas en las antiguas Grecia y Roma. Por ejemplo, fueron negadas por estoicos y epicúreos, que no sólo regresaron a las ideas presocráticas de evolución cósmica sino que también trabajaban con versiones de un universo infinito. Como hemos visto, la exposición que hacía Lucrecio de la cosmología en *De rerum natura* era sobre todo antiaristotélica. La escuela estoica, que incluía a Crísipo y más tarde a Posidonio como miembros destacados, elaboró una cosmología en donde el elemento fuego era esencial y se veía como la fuente de los otros tres elementos. Ellos estaban de acuerdo con Aristóteles en que no podía haber vacío dentro del mundo material, pero no en que fuera imposible un vacío extra-cósmico. Por el contrario, suponían que «más allá del cosmos se extiende un mundo no físico infinito». Los filósofos estoicos imaginaban que el mundo estaba pulsando lentamente, realizando ciclos de condensación y rarefacción. Un vacío extra-cósmico no provocaría que la materia se disipase en el vacío, como argumentaban los aristotélicos, pues «el mundo material se conserva a sí mismo mediante una fuerza inmensa, y se contrae y expande alternamente en el vacío siguiendo sus transformaciones físicas, unas veces consumido por fuego, otras empezando una vez más la creación del cosmos».<sup>27</sup>

El problema de la eternidad del mundo (o de la Tierra) siguió siendo tema de disputa, especialmente entre los filósofos estoicos que se oponían a la tesis de Aristóteles con argumentos empíricos basados en la superficie observada de la Tierra. Ellos razonaban que la erosión es un proceso unidireccional, y si hubiera estado en acción durante un tiempo infinito, todas las montañas y valles habrían sido aplanados; claramente no lo están, y por lo tanto la Tierra debe haber existido solamente durante un período limitado de tiempo. Este argumento contra la eterni-

dad del mundo fue desarrollado por el filósofo estoico Zenón de Citium alrededor del 300 a.C., y de ello informa Teofrasto como sigue:

Si la Tierra no hubiera tenido un principio en el que nació, ninguna parte de ella se vería elevada sobre el resto. Las montañas serían ahora muy bajas, todas las colinas estarían niveladas con la llanura... Tal como es, la no uniformidad constante y la gran cantidad de montañas con sus enormes alturas que ascienden al cielo son indicios de que la Tierra no ha existido siempre.<sup>28</sup>

Ésta es la primera vez que encontramos un tema que llegaría a ocupar una posición destacada en el pensamiento cosmológico más de dos mil años después: existen procesos unidireccionales en la naturaleza —ya vengan dados por erosión, radioactividad o aumento de entropía— que hablan en contra de un mundo eterno (véase la sección «Termodinámica y gravitación»). Enfrentados al argumento de los estoicos, los defensores de la física aristotélica postulaban que los procesos geológicos corruptores estaban contrarrestados por procesos generadores, pero eran incapaces de ofrecer una explicación satisfactoria, basada en la teoría de la materia de Aristóteles, de cómo actuaban estos procesos compensadores.

### *Aristarco y las dimensiones del universo*

Siempre ha sido una tarea importante de astrónomos y cosmólogos determinar distancias en el universo, desde la superficie de la Tierra a objetos lo más lejanos posible. Es también una de las tareas más difíciles.<sup>29</sup> ¿Qué tamaño tenía el universo de los antiguos griegos? Nadie lo sabe, pues no había ninguna manera en que pudieran medirse las distancias a las estrellas y los planetas (excepto el Sol y la Luna). De hecho, ni siquiera el orden de los planetas podía determinarse inequívocamente, salvo que la esfera de las estrellas fijas era obviamente la más alejada de la Tierra, y la Luna era la más próxima. Pese a todo, los griegos no estaban totalmente perdidos e hicieron algunos progresos en la determinación de distancias cósmicas, aunque sólo fuera en la vecindad de la Tierra.<sup>30</sup>