

Hawking decía además, en forma famosa y controvertida, que su imagen de ausencia de frontera en el universo tenía profundas implicaciones teológicas, pues hacía a Dios superfluo: «Mientras el universo tenía un principio, podíamos suponer que tenía un creador. Pero si el universo es en realidad completamente autocontenido, sin ninguna frontera o borde, no tendría principio ni fin: simplemente sería. ¿Qué lugar habría entonces para un creador?»⁴⁸

La teoría de Hartle-Hawking fue muy discutida, no porque se pensara que su escenario era realista sino a causa de su novedad conceptual y matemática. Fue seguida de varias otras propuestas basadas en la gravedad cuántica, el tipo de teoría que pretende unificar la relatividad general con la mecánica cuántica y que presumiblemente gobierna el estado más primitivo del universo Big Bang alrededor o antes del tiempo de Planck. Entre las muchas teorías de este tipo, la teoría de cuerdas (en una de sus muchas versiones) es la más conocida, y la más desarrollada desde que fuera introducida como una teoría de las interacciones fuertes hacia 1970. La teoría de cuerdas trabaja con minúsculos objetos multidimensionales (cuerdas o branas) de un tamaño cercano a la longitud de Planck de 10^{-35} metros, y los teóricos de cuerdas creen que todas las partículas y campos pueden entenderse en términos de estos objetos hipotéticos. No era una sorpresa que la ambiciosa y matemáticamente compleja teoría de cuerdas fuera utilizada también como un fundamento para las teorías cosmológicas.

Algunos de los escenarios cosmológicos propuestos por los teóricos de cuerdas tienen en común con el modelo de Hartle-Hawking que evitan el molesto comienzo cósmico. Las cuerdas cuánticas tienen un tamaño no nulo y no pueden colapsar hasta un punto infinitesimal, lo que proporciona una vía para eliminar la singularidad inicial, aunque no de una manera muy satisfactoria. Si el universo empezó en una cuerda no reducible, ¿de dónde procedía la cuerda? Según Gabriele Veneziano, un físico italiano que fue pionero de la teoría de cuerdas a finales de los años sesenta, tiene sentido preguntar qué sucedió antes del Big Bang. En lo que se conoce como el escenario pre-Big Bang, existió un universo acelerado antes del Big Bang, del que nuestro universo inicialmente decelerado emergió en una violenta transición. Veneziano explica que «el universo pre-big bang era una imagen especular casi

perfecta del universo post-big bang. Si el universo es eterno en el futuro, con su contenido diluido en una especie de sopa tenue, es también eterno en el pasado. Hace un tiempo infinitamente largo estaba casi vacío, lleno sólo con un gas caótico, tenue y ampliamente disperso de materia y radiación».⁴⁹ Puede parecer poco probable que el escenario de cuerdas pueda establecer contacto alguna vez con la física empírica, pero los defensores de la teoría pre-Big Bang piensan que sí tiene consecuencias físicas y que éstas pueden ser medibles como pequeñas variaciones de temperatura en el fondo cósmico de microondas.

Permítaseme citar a dos destacados cosmólogos de partículas estadounidenses, Edward Kolb y Michael Turner, quienes en 1990 publicaron una monografía sobre el universo primitivo:

Cualquier cosa que sea lo que los cosmólogos futuros escriban sobre la cosmología en las décadas siguientes al descubrimiento de la CMBR (radiación cósmica de fondo), podemos estar seguros de que no criticarán a los cosmólogos contemporáneos por no tomar suficientemente en serio sus ideas teóricas —y sus a veces especulaciones desbocadas—. Quizá los cosmólogos futuros se rían de nuestra ingenuidad. Pero, si lo hacen, nos cabe esperar que admirarán nuestro valor y audacia para abordar problemas que en otro tiempo se pensaba que estaban más allá del alcance de la comprensión humana.⁵⁰

Esta valoración es tan válida hoy como lo era en 1990. De hecho, en su prefacio a la edición en tapas blandas de 1993, Kolb y Turner señalaban que «Nos sorprendería mucho que el futuro no incluyera una idea revolucionaria o un descubrimiento inesperado». Estaban más cerca de la verdad de lo que podían haber imaginado.

La cosmología en perspectiva

La cosmología es la ciencia del universo y por lo tanto está basada en un concepto —el universo, mundo o cosmos— que es inmensamente mayor y más abstracto que lo que puede percibirse directamente. En el curso de la historia el propio significado del universo ha cambiado, y a veces radicalmente, y ésta es una de las razones principales

del desarrollo algo irregular del pensamiento cosmológico. Los conceptos babilónico y griego del universo tienen muy poco en común con el de los cosmólogos modernos, de modo que no sorprende que la historia a largo plazo pueda parecer falta de continuidad. Pero a pesar de todos los cambios, la moderna imagen del mundo tiene un vínculo con ideas sobre el universo que surgieron hace unos dos mil quinientos años. Es el resultado de un proceso histórico largo y complejo con raíces que se remontan a la era de los filósofos presocráticos, si no antes. Aristóteles señaló que la cosmología se derivaba de la búsqueda primaria de los seres humanos por conocer lo máximo posible sobre el universo observado. En su *Metafísica* escribió:

Es debido a su asombro por lo que los hombres empiezan ahora y empezaron inicialmente a filosofar; se preguntaron originalmente por las dificultades obvias, luego avanzaron poco a poco y se fijaron en las dificultades sobre las materias mayores, e.g., sobre los fenómenos de la Luna y los del Sol y las estrellas, y sobre el origen del universo.⁵¹

La sensación de asombro de la que hablaba Aristóteles es una invasión en la historia de la cosmología, pues está enraizada en la curiosidad más elemental. Cuando los físicos modernos se preguntan por la naturaleza de la energía oscura o por qué hay muchos más fotones que bariones en el universo, se están embarcando en una búsqueda del mismo carácter que cuando Eudoxo se preguntaba por los movimientos retrógrados de Marte en su viaje por los cielos. Aunque las respuestas a las preguntas han cambiado mucho, hay una continuidad en el tipo de preguntas cuyas respuestas la gente quiere saber. ¿Es el mundo finito o infinito? ¿Existe vida en otros lugares del universo? ¿El mundo ha existido siempre o tuvo un origen? ¿Es estático o está en evolución? ¿Tiene el universo un propósito? Preguntas grandiosas como éstas fueron planteadas hace más de dos mil años, y desde entonces pueden seguirse a través de la historia, incluida la era moderna. Sabemos las repuestas a algunas de las preguntas, pero no a todas. Y hay preguntas que quizá son importantes, pero que quizá no tengan significado científico.

Durante largos períodos de tiempo el universo no era tan sólo un objeto de estudio; se pensaba que tenía un sentido y que estaba asocia-

do a la existencia de seres humanos y a su lugar en el cosmos. Entender el universo implicaba necesariamente entender su significado y su propósito, conceptos que no podían separarse de un contexto religioso. Las referencias a dioses, espíritus e inteligencias como agentes activos en el cosmos dinámico continuaron hasta bien entrado el siglo XVI. Newton explicó los fenómenos celestes en términos de su ley de gravedad, pero al mismo tiempo necesitaba a Dios — «muy habilitado en mecánica y geometría» — para dar cuenta de la estabilidad del universo. Un siglo más tarde los astrónomos aún podían referirse al Creador, pero éste no era invocado para explicar fenómenos en los cielos. Se dice que cuando Napoleón Bonaparte hubo hojeado la *Exposition du systéme du monde* de Laplace comentó a su autor que mientras que Newton hablaba de Dios en los *Principia*, Dios no era mencionado en la *Exposition*. Laplace respondió, «Ciudadano Primer Cónsul, yo no necesito dicha hipótesis». ⁵² Tampoco los cosmólogos modernos necesitan dicha hipótesis; pero, como hemos observado, los flirteos con aspectos religiosos no son raros en la teoría cosmológica actual. La gran mayoría de los cosmólogos, no obstante, sigue su ciencia sin referencias a cuestiones religiosas, muy a la manera de Laplace.

Paradigmas y tradiciones

En general, o bien una rama particular de la ciencia evoluciona de forma continua y acumulativa, o bien su desarrollo puede estar caracterizado por una serie de cambios revolucionarios que implican cambios en el fundamento mismo de la ciencia. En su influyente *La estructura de las revoluciones científicas*, Thomas Kuhn defendía una visión dinámica de la ciencia donde períodos de «ciencia normal» gobernada por paradigmas terminan en un estado de crisis, lo que puede desencadenar una «revolución» que lleva a que el viejo paradigma sea reemplazado por uno nuevo. Según el modelo original de Kuhn de 1962, dos paradigmas rivales pueden coexistir solamente durante un breve período de tiempo, hasta que uno de ellos erradica al otro. Pues- to que describen la naturaleza en lenguajes diferentes e intraducibles, son incommensurables y no hay manera de decidir entre ellos en térmi-

nos puramente racionales. Cualquiera que sean las virtudes del intento de Kuhn de reformar la filosofía de la ciencia, hace tiempo que se ha reconocido que las rupturas revolucionarias del tipo fuerte del que él hablaba raramente ocurren en la historia real de la ciencia. Por otra parte, se pueden utilizar razonablemente los conceptos de paradigma y revolución en un sentido más débil y examinar el desarrollo histórico en el marco de dichos conceptos. Yo creo que la historia de la cosmología da apoyo a la noción de ciencia gobernada por paradigmas e incluso de rupturas revolucionarias, aunque no en el sentido radical originalmente propuesto por Kuhn.

Tenemos en el «paradigma del círculo» un notable ejemplo de una creencia fundamental y tenaz que sobrevivió durante casi dos milenios y que muestra algunas de las características de un paradigma kuhniano. Según esta creencia, que se remonta a Platón y Eudoxo, los movimientos observados de los cuerpos celestes deben entenderse necesariamente en términos de movimientos circulares uniformes. Como señalaba Gemino, era parte de la definición de astronomía, y por ello indispensable. Si la astronomía era el arte de reducir las observaciones a movimientos circulares, ¿cómo podían estar las teorías de los planetas de Ptolomeo seriamente equivocadas?

Se necesitó el genio de Kepler para reconocer que la creencia era meramente una hipótesis de trabajo, no una necesidad, y pasaron varias décadas hasta que la idea de Kepler fue aceptada por la mayoría de los astrónomos. La creencia en los círculos celestes era parte de un complejo mayor de ideas paradigmáticas, que incluía la idea de que el universo era finito (y de forma esférica) y estaba dividido en dos regiones muy diferentes: el mundo sublunar, por debajo de la Luna, y el mundo celeste por encima de ella. También en la historia posterior encontramos ejemplos de creencias y tradiciones que raramente eran cuestionadas y formaban el marco de pensamiento cosmológico, y con ello tenían el carácter de paradigmas. Hasta 1910 aproximadamente era una creencia generalizada que el universo estelar estaba limitado a la Vía Láctea, y hasta 1930 se daba por garantizada la naturaleza estática del universo en conjunto. La cosmología actual se basa en la teoría de la relatividad general y algún tipo de escenario big bang, elementos que están más allá de discusión y se conciben como características de-

finitorias de la teoría cosmológica. Pero aunque puede ser tentador caracterizar estas creencias como «paradigmáticas», lo son en un sentido diferente del que hablaba Kuhn en su obra de 1962.

Igual que ha habido períodos en que la astronomía y la cosmología estuvieron gobernadas por dogmas paradigmáticos, también ha habido una serie de cambios en los que la visión aceptada del cosmos se venía abajo y era reemplazada por una nueva. Ninguna de estas rupturas, por dramáticas que puedan haber parecido a los científicos contemporáneos, han sido revoluciones en el sentido radical de choques entre visiones del mundo incommensurables. La muy discutida revolución copernicana fue un proceso de transición a largo plazo en el que el sistema heliocéntrico era comparado racional y sistemáticamente con el tradicional sistema geocéntrico. El resultado del proceso revolucionario fue un rechazo de la visión del mundo tradicional, pero los astrónomos implicados en el proceso no necesitaban comprometerse encañonadamente con uno de los sistemas rivales. Como demuestra la existencia del sistema tyconico y otros sistemas híbridos, era perfectamente posible tomar una vía intermedia, al menos durante algún tiempo. La «revolución» copernicana es, en gran medida, un mito. Hay sucesos en la historia de la cosmología que se acercan mucho a rupturas revolucionarias, tales como el reconocimiento hacia 1930 de que el universo se está expandiendo. Aquí tenemos un cambio importante en la concepción del mundo que ocurrió casi instantáneamente.

Los cosmólogos modernos, como la mayoría de los científicos (por no mencionar a los periodistas científicos), le tienen cariño a la metáfora de la revolución, que utilizan de forma repetida y algo indiscriminada. Hablan rutinariamente de «el paradigma Λ CDM» y la «revolución» actual que constituye el descubrimiento del universo acelerado supuestamente lleno de materia y energía oscura. En la primavera de 1997, en un momento en que se estaba reconociendo la perspectiva de la nueva imagen del mundo, un cosmólogo escribió: «El campo de la cosmología está experimentando una revolución, impulsada por espectaculares procesos observacionales y por nuevos escenarios teóricos importados de la física de partículas».⁵³ Pueden encontrarse en la literatura docenas de valoraciones expresadas de forma similar. Esto es muy interesante, pero no implica que lo que sucedió a finales de los

años noventa fuera realmente una «revolución» en el propio sentido del término.

El innegable elemento de continuidad en el desarrollo científico es debido en gran medida a la presencia casi permanente de buenos datos experimentales y observacionales. Se espera que nuevas teorías expliquen observaciones fiables tan bien o mejor que la teoría más vieja, un requisito que naturalmente limita cuánto puede desviarse empíricamente la nueva teoría de la vieja. La teoría heliocéntrica de Copérnico tenía que incluir una explicación de los movimientos retrógrados de los planetas, igual que la teoría del estado-estacionario tenía que dar cuenta de la ley desplazamiento hacia el rojo-distancia de Hubble. Y Copérnico tenía que explicar la ausencia de observación de paralaje estelar, como lo había explicado la teoría de Ptolomeo.

Pero los datos no son puramente observacionales, sino que son en parte un producto de teoría y expectativas, como ilustran varios casos en la historia de la cosmología. La constante de Hubble es una cantidad observacional, aunque no se reduce a eso, pero su relación con la edad del universo no lo es. La edad finita del universo es un constructo teórico que sólo tiene significado dentro del marco de ciertas teorías cosmológicas. Además, ¿cuándo es una observación relevante para la cosmología? Esto está lejos de ser obvio, como lo ilustra la oscuridad del cielo nocturno, un fenómeno totalmente ordinario que Chéseaux elevó a un problema cosmológico en 1744, lo que más tarde se conocería como paradoja de Olbers. Análogamente, la composición química del universo sólo se hizo cosmológicamente interesante con el programa de investigación arqueológico-nuclear de Gamow de los años cuarenta.

La historia de la cosmología está llena de casos en donde anuncios observacionales han sido aceptados con demasiada ligereza. Por ejemplo, en la primera parte del siglo xx las aparentemente fiables medidas de Van Maanen de los movimientos propios en nebulosas espirales ofrecían fuerte apoyo contra la teoría del universo isla. Se creía entonces que sus datos eran hechos brutos, pero en 1930 se consideraban espurios. El efecto Stebbins-Whitford, que se creía fiable y fundado en datos sólidos, se evaporó en los años cincuenta. Análogamente, cuando Ryle concluyó en 1955, a partir de medidas radioastronómicas, que el modelo del estado-estacionario era refutado por observaciones, los

datos eran inadecuados y la conclusión estaba teñida del poco aprecio de Ryle por la teoría del estado-estacionario. La teoría era de hecho errónea, pero también lo eran los datos de Ryle.

Las observaciones son por supuesto cruciales para la cosmología, pero si se creen sin reservas pueden dificultar o impedir el progreso en lugar de llevarlo adelante. Tomemos de nuevo un ejemplo de la cosmología del siglo xx: el valor de Hubble para el parámetro de expansión, equivocado en un factor de siete más o menos, fue aceptado como correcto sin cuestionarlo durante más de dos décadas. El valor pequeño del tiempo de Hubble causaba problemas para las cosmologías de tipo Big Bang, que habrían sido recibidas de manera más positiva si los astrónomos no hubieran aceptado tan a ciegas el resultado de Hubble. Sólo después de 1952, cuando Baade y otros reconsideraron la escala de tiempo, el problema de la edad fue traído a la luz y se comprendió que la «paradoja de la edad» no era una paradoja real.

La intrincada cuestión de la relación entre observación y teoría en cosmología fue examinada de forma maestra y provocativa por Bondi en un artículo de 1955, cuyo mensaje general era que cualquier discrepancia entre teoría y observación podría ser achacada tanto a las observaciones como a la teoría. Con respecto a las denominadas observaciones puras, escribía:

La parte puramente fáctica de la inmensa mayoría de los artículos observacionales es pequeña. También es importante darse cuenta de que estos hechos básicos están obtenidos frecuentemente en el límite mismo del poder de los instrumentos utilizados, y por ello tienen una incertidumbre considerable. Calificar a los resultados observacionales como «hechos» es un insulto a las labores del observador, un intento erróneo de desacreditar a los teóricos, un flaco servicio a la astronomía en general y es muestra de una completa carencia de sentido crítico. De hecho, yo diría que este tipo de mal uso irresponsable de la terminología es la maldición de la astronomía moderna.³⁴

El estatus de los modelos cosmológicos

La distinción entre *realismo* e *instrumentalismo* (o conceptos relacionados tales como positivismo y pragmatismo) es un tema central en

la filosofía de la ciencia, donde es discutido en particular en conexión con la microfísica y la mecánica cuántica. Según el realista, teorías y modelos tratan de los objetos y mecanismos de la naturaleza: si los describen correctamente son verdaderos, y si no, son falsos. En resumen, la ciencia pretende entender cómo es realmente la naturaleza. El instrumentalista, por otra parte, considera que una teoría es un método o herramienta para reproducir irregularidades observadas y predecir el resultado de observaciones y experimentos futuros. Una teoría puede ser útil a este respecto, y eso es todo lo que podemos esperar y lo que nos interesa. Está fuera de las posibilidades de la ciencia determinar la verdadera naturaleza de la realidad, un problema del que se afirma que es metafísico y no físico.

La distinción puede referirse también a objetos antes que a teorías. En este caso, el realista afirmará que «el universo» designa una entidad que existe independientemente de toda indagación cosmológica. Por su parte, el instrumentalista considera que «el universo» es un concepto al que sólo puede atribuirse un significado en un sentido pragmático, pues es un constructo de la teoría cosmológica.⁵⁵ Aunque cuestiones concernientes al realismo y el antirrealismo han sido discutidas principalmente en microfísica (¿existen realmente los quarks?), no son de menos relevancia en el estudio del universo y sus constituyentes (¿existen realmente los agujeros negros?). La tensión entre las dos visiones opuestas puede seguirse a lo largo de buena parte de la historia de la cosmología.

Los babilonios generaron largas tablas con posiciones de los cuerpos celestes. Su actitud hacia la astronomía era instrumentalista, pues sus teorías, en forma de tablas, eran puras herramientas computacionales. Fueron capaces de predecir, por extrapolación, fenómenos celestes, aunque no mostraban ningún interés en explicar por qué ocurrían los fenómenos o por qué los cuerpos celestes se movían como lo hacían. Eudoxo proporcionó un modelo geométrico para el movimiento de los planetas, pero no afirmó que ofreciera una explicación o que los planetas se movieran realmente en una serie de esferas concéntricas. Una perspectiva mucho más realista fue introducida por Aristóteles. No satisfecho con modelos que simplemente funcionaban, él pretendía una teoría física del universo con poder explicatorio. El cenit de la as-

tronomía matemática griega, representada por el *Almagesto* de Ptolomeo, tenía una clara orientación instrumentalista, con su elaborado sistema de deferentes, excéntricas y epiciclos. Reproducía los fenómenos celestes, pero es difícil creer que Ptolomeo pensara realmente que los cuerpos celestes se movían tal como prescribía su modelo. Por otra parte, esta visión tradicional debe ser modificada a la luz de su *Hipótesis de los planetas* que, como hemos visto, tiene un carácter muy diferente. El modelo de la *Hipótesis de los planetas* no era fenomenológico, sino un intento realista por entender la estructura del universo en términos de física aristotélica. Ptolomeo parece haber considerado el modelo como una verdadera representación de los cielos, mientras que la verdad es una cualidad ajena a la mente del instrumentalista.

El mismo tema apareció durante la Edad Media y el Renacimiento, cuando los modelos del mundo se solían ver sólo como modelos, sin pretender representar la estructura del universo real. Tenemos una expresión de esta postura en la *Guía de perplejos* de Moisés Maimónides, que data de aproximadamente el año 1200: «El objeto de dicha ciencia (la astronomía) es suponer como hipótesis una configuración que haga posible que el movimiento de la estrella (planeta) sea uniforme y circular sin aceleración o deceleración o cambio en ella, y hacer inferencias que se deducen necesariamente de la hipótesis de que dicho movimiento está de acuerdo con lo que se observa».⁵⁶ La tarea de los astrónomos era «salvar los fenómenos». Éste era también el mensaje de Osiander en su infame prefacio al *De revolutionibus* de Copérnico, mientras que Copérnico era de hecho un realista, no un instrumentalista. La batalla entre los dos sistemas del mundo en las décadas en torno a 1600 no se limitó a cuál de los sistemas proporcionaba la descripción más precisa y económica del universo. Si eso hubiera sido todo, Galileo no hubiese sido juzgado en 1633.

Saltando en el tiempo, el tema resurgió en la temprana cosmología relativista, donde los modelos de Einstein, De Sitter y Friedmann debían contarse en la tradición instrumentalista, mientras que Lemaître tuvo cuidado en señalar que su modelo de 1927 pretendía una explicación de cómo evoluciona el universo real con el tiempo. Hemos encontrado otro ejemplo de la actitud instrumentalista en la interpretación de Hubble de la expansión del universo: en lugar de concluir que

el universo se expande, él prefirió el terreno más seguro de atenerse a la relación desplazamiento hacia el rojo-distancia basada en la observación. Asimismo, la controversia entre el Big Bang y la teoría del estado-estacionario en los años cincuenta no concernía simplemente a la comparación entre datos y teoría. Gamow creía que el Big Bang había sucedido, que era real, y Hoyle que no lo era. Por el contrario, Milne entendía la cosmología de forma instrumentalista, pues creía que el origen del universo no era un hecho objetivo sino un producto del tipo de teoría utilizada para describir el universo.

Con la proliferación de modelos relacionados con el Big Bang después de 1965, la situación se ha hecho más compleja. Por una parte, los cosmólogos quieren entender el universo real y cómo ha evolucionado, no sólo ofrecer historias como-si. Por otra parte, es obvio que muchos de los modelos de la cosmología moderna, especialmente los concernientes al universo muy primitivo, no pretenden representar el mundo real: son escenarios o, a veces, tan sólo modelos matemáticos caseros. Si pueden dar cuenta de rasgos observados del universo o hacer predicciones, tanto mejor, pero no necesariamente se le da alta prioridad a la correspondencia con las observaciones. Stephen Hawking tiene en común con Osiander que prefiere una perspectiva anti-realista acerca de las teorías cosmológicas: «Yo soy positivista ... no pido que una teoría se corresponda con la realidad porque no sé cuál es ésta. La realidad no es una cualidad que uno pueda comprobar con un papel tomasol».⁵⁷

¿Es la cosmología una ciencia?

Durante buena parte de su larga historia, la cosmología ha sido un pequeño patio trasero situado detrás de las espléndidas mansiones de la astronomía y la filosofía. La mayoría de los científicos tenían mejores cosas que hacer que enzarzarse en especulaciones estériles sobre el universo en general, especulaciones que se consideraban pasatiempos inocuos pero que en ocasiones se ganaban críticas con base epistemológica. La cosmología se basa necesariamente en extrapolaciones e hipótesis de uniformidad: por ejemplo, que las leyes fundamentales de la

física son válidas en todo el universo y quizá, incluso de forma más problemática, para el universo en conjunto. Durante la segunda mitad del siglo XIX, en relación con las discusiones sobre la muerte térmica, la cosmología cayó bajo el fuego de los científicos que encontraban que tales hipótesis eran claramente acientíficas. Uno de ellos fue Ernst Mach, y su actitud crítica fue seguida por muchos otros de inclinación positivista. El filósofo germano-americano John Stallo decía en tono acusador en 1882 que «todas las cosmogonías que pretenden ser teorías del universo como un todo absoluto, a la luz de leyes físicas y dinámicas, son fundamentalmente absurdas».⁵⁸ Pero esto es precisamente lo que pretenden los cosmólogos: ofrecer teorías del universo como un todo absoluto.

La nueva cosmología, basada en la teoría de la relatividad general de Einstein, no atrajo al principio mucha atención, pero con el descubrimiento de la expansión del universo se hizo mucho más visible y fue sometida a la crítica filosófica. ¿Cómo podían estos cosmólogos construir modelos del universo entero y discutirlos con tal confianza? ¿Estaban dedicados a la ciencia o a un juego matemático? El físico estadounidense Percy W. Bridgman, premio Nobel de 1946, fue un primer crítico de la nueva cosmología. Bridgman se adscribía al operacionalismo, una versión de la filosofía positivista de la ciencia, y desde esta posición dudaba de que la cosmología llegara a ser alguna vez una verdadera ciencia. «Para el crítico no informado debe parecer imprudente escudriñar 10¹⁶ años atrás al pasado, o incluso a distancias mayores en el futuro, sobre la base de leyes verificadas hace menos de trescientos años», escribió en 1932. Al año siguiente atacaba a los cosmólogos relativistas por su «convicción metafísica» en que «el universo marcha según principios matemáticos exactos, y ... es posible que los seres humanos formulen estos principios por un afortunado *tour de force*».⁵⁹

La crítica de Bridgman venía de alguien de fuera, pero fue repetida algunos años más tarde y de una forma más intensa por Herbert Dingle, quien estaba bien familiarizado con la teoría cosmológica a la que él mismo había contribuido (en 1933 publicó uno de los primeros estudios sobre universos anisótropos). Aunque el ataque de Dingle de 1947 estaba especialmente dirigido a la cosmofísica racionalista de Milne, Dirac y Eddington, también incluía una crítica más general a

la cosmología contemporánea, que para él resultaba exótica, arrogante y alejada del sano razonamiento científico. Lo que más le molestaba era la confianza acrítica de la cosmología en las matemáticas y en principios generales de naturaleza a priorística. «En lugar de la inducción de principios a partir de los fenómenos se nos ofrece una pseudociencia de cosmitología invertebrada», tronaba.⁶⁰ Cuando Dingle retomó su ataque a la cosmología tras la segunda guerra mundial, ahora dirigido en particular a la teoría del estado estacionario, su voz no era menos dura. Él y otros críticos objetaban no sólo a la teoría de Bondi-Gold-Hoyle, sino también a la cosmología evolutiva relativista. En cualquiera de sus versiones, la cosmología contemporánea trataba la dudosa cuestión de la creación por medio de complejas y opacas matemáticas, lo que sólo confirmaba a los críticos en su opinión de que la cosmología se había degradado a un estatus pseudocientífico. La caracterización de Dingle en 1953 de la teoría del estado-estacionario incluía también a la teoría del Big Bang: «No tiene otra base que la fantasía de unos pocos matemáticos que piensan que bonito sería que el mundo estuviera hecho así».

Aunque los cosmólogos en los años cincuenta prestaron poca atención a las objeciones de Dingle y sus aliados, sí estaban preocupados por el estatus científico de la cosmología. ¿Es la cosmología una ciencia como la física y la química? ¿Cuáles son los criterios de verdad, y cómo difieren de los adoptados por otras ciencias? ¿Hasta qué punto es válida la base conceptual de la cosmología? Estas preguntas eran discutidas abiertamente, por ejemplo en el antes mencionado debate entre Bondi y Whitrow en 1954. La cosmología entró en una etapa mucho más madura después de 1965, con el reconocimiento general de la teoría del Big Bang estándar, pero seguía habiendo cierta incomodidad por el estatus científico del campo. No todos los astrónomos y físicos dieron la bienvenida a la entrada de la teoría de gran unificación y de la gravedad cuántica en la cosmología del universo primitivo, un área en donde a veces era difícil distinguir entre matemáticas y física. «Los matemáticos sueñan inocuas y sofisticadas fantasías, y los nuevos cosmólogos las compran como si fueran un terreno real», tal como lo expresó un crítico.⁶¹ Como ya se ha mencionado, Tony Rothman y George Ellis advirtieron en 1987 que la cosmología podría estar en camino de convertirse en «metafísica».

Este tipo de crítica o de preocupación ha continuado hasta el presente, como lo ilustra un artículo del año 2000 en la revista *General Relativity and Gravitation*. M. J. Disney, un astrónomo observacional extragaláctico, repetía muchas de las acusaciones de críticos anteriores, no sólo en sustancia, sino también en su retórica. Su preocupación básica era la laguna existente entre observación y teoría, un problema que siempre ha amenazado a la cosmología, y también la disposición irrefrenable de los cosmólogos a extrapolar la física conocida a enormes extensiones de espacio y tiempo. La materia oscura fría, aceptada por la mayoría de los cosmólogos, sonaba a Disney «como una liturgia religiosa que sus adherentes recitan como un mantra con la tonta esperanza de que brotará a la existencia». La comparación entre cosmología y religión no era nueva, ni era accidental. «El aspecto más insano de la cosmología es su paralelismo con la religión. Ambas tratan con preguntas grandiosas pero que probablemente no tienen respuesta. La audiencia absorta, la exposición a los medios de comunicación, la gran venta de libros, tientan a sacerdotes y bribones, tanto como a los crédulos, como ningún otro tema en la ciencia».⁶²

La tecnología y el universo

Quizá sea duro asociar cosmología con algo tan mundano como la ingeniería y la tecnología (seguramente habría conmovido a Aristóteles), pero no puede haber ninguna duda de que las tecnologías de instrumentos no han sido de menos importancia en el progreso de la cosmología que los avances en teoría. Hasta el siglo XVII los astrónomos tenían que valerse de su simple vista y de instrumentos relativamente primitivos como cuadrantes, sextantes y esferas armilares. El uso de estas técnicas tradicionales alcanzó un clímax con los instrumentos de Tycho Brahe en su Observatorio de Uraniborg. Con la invención del telescopio a comienzos del siglo XVII se inició un nuevo capítulo en la historia de la astronomía, aunque al principio tuviera una importancia cosmológica limitada. Pero con telescopios mayores y mejores, que llegaban hasta las débiles nebulosas, la situación cambió. Fue el soberbio reflector de 40 pies de William Herschel el que le lle-

vó a la cosmología que él describía en «La construcción de los cielos»; y fue el telescopio gigante de lord Rosse el que en 1846 reveló la existencia de nebulosas espirales, un descubrimiento de consecuencias imprevisibles.

La fotometría astronómica — los métodos para medir la intensidad de la luz estelar — tuvo su inicio en los años treinta del siglo XIX, y durante el medio siglo siguiente fueron introducidas técnicas fotométricas muy mejoradas por Zöllner en Alemania y Edward C. Pickering en Estados Unidos. Métodos fotoeléctricos para uso astronómico fueron avanzados en torno a 1910 por el astrónomo estadounidense Joel Stebbins, quien por medio de una célula de selenio pudo registrar la curva luminosa para la estrella variable Algol y medir diferencias en intensidad luminosa tan pequeñas como las correspondientes a magnitudes 0,01. Con el desarrollo de los circuitos electrónicos y los fotomultiplicadores tras la segunda guerra mundial, la sensibilidad aumentó todavía más.

El problema con las placas fotográficas tradicionales era que sólo respondían a un 1 por 100 aproximadamente de la energía luminosa incidente, lo que implicaba que se necesitaban largos tiempos de exposición en el caso de fuentes débiles. Este problema se redujo a comienzos de los años sesenta cuando un aparato de imagen electrónica llamado el tubo imagen fue utilizado para amplificar la luz incidente (una tecnología similar fue utilizada en microscopía). Aunque el tubo imagen no sustituyó a la placa fotográfica, dicha sustitución tuvo lugar cuando se pusieron en uso los detectores digitales a partir de 1970. Con esta tecnología, las señales luminosas se transformaban directamente en pulsos eléctricos que eran almacenados en un computador. Un gran avance ocurrió en 1970, cuando George E. Smith y Willard S. Boyd, dos científicos de los Laboratorios Bell, anunciaron su invento de un nuevo aparato basado en semiconductores que generaban señales eléctricas cuando eran expuesto a la luz. El CCD (dispositivo de carga acoplada) no fue inventado como detector de luz débil, pero en menos de una década los primeros detectores CCD estaban en uso para propósitos astronómicos. El CCD se convirtió rápidamente en una herramienta indispensable para astrónomos y cosmólogos, y funcionaba tanto en observatorios terrestres como en los situados en el espacio.⁶³

Los CCD y las tecnologías de imagen relacionadas reemplazaron en gran medida a la fotografía tradicional, que como técnica astronómica se remonta a los años cuarenta del siglo XIX. El primer ejemplo de astrofotografía data de 1840, cuando el químico estadounidense John W. Draper produjo un daguerrotipo de la Luna. El tiempo de exposición fue de 20 minutos. La astrofotografía fue continuamente mejorada y se hizo de importancia especial cuando se combinó con el espectroscopio, otra de las grandes invenciones instrumentales del siglo XIX. El famoso descubrimiento de Hubble de la relación velocidad-distancia en 1929 descansaba de forma crucial en tres tipos de tecnología: el telescopio, el espectroscopio y las técnicas fotográficas.

La revolución instrumental ha sido de importancia cosmológica directa especialmente desde los años setenta del siglo pasado, aunque vale la pena recordar que antes de esto la tecnología de radio y microondas había desempeñado un importante papel. Como ha señalado un comentarista, «es sorprendente pensar que diez años de radioastronomía han enseñado más a la humanidad acerca de la creación y organización del universo que mil años de religión y filosofía».⁶⁴ El descubrimiento de la radiación cósmica de microondas, a menudo aclamado como el descubrimiento cosmológico del siglo, fue un logro de la ingeniería tanto como un logro científico. Se podrían contar otras historias tecno-cosmológicas sobre las observaciones desde satélites y sobre la astronomía fuera de la parte visible del espectro.⁶⁵ Lo que cuenta es que desde que Galileo dirigió en el verano de 1609 su telescopio hacia el cielo, el progreso tecnológico ha sido esencial para la cosmología, un proceso que se ha acelerado enormemente desde los años cincuenta y que es hoy de tremenda importancia.