

MODELOS COSMOLÓGICOS: ¿FICCIONES ÚTILES O DESCRIPCIONES REALISTAS DEL UNIVERSO?¹

Francisco José Soler Gil

Universität Bremen — Studiengang Philosophie

Resumen

En este artículo se describen brevemente los dos enfoques ontológicos principales desde los que se han venido interpretando los modelos cosmológicos a lo largo de la historia: El enfoque instrumentalista, y el enfoque realista. Para el instrumentalismo, los modelos cosmológicos serían una ficción matemática útil para salvar una serie de fenómenos. Para el realismo, dichos modelos constituirían una descripción de cómo es realmente el universo. Al hilo de algunos ejemplos históricos, se discuten las situaciones que favorecen un enfoque instrumentalista y las que favorecen un enfoque realista de la cosmología. Esta discusión nos permite plantearnos la pregunta de si es más plausible considerar los modelos actuales como descripciones realistas o como ficciones. Se esbozarán algunos de los elementos a tener en cuenta para decidir este asunto en el caso de la cosmología relativista y de la cosmología cuántica.

Abstract

The two main views of the interpretation of cosmological models through history are discussed in this article: They are the instrumentalist and the realistic view. For instrumentalism, the models are mathematical fictions that are useful for connecting the

¹ Los apartados 3 y 5 de este artículo constituyen una versión ampliada de una charla dada originalmente en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) el 2 de junio de 2006. Agradezco a Martín López Corredoira su amable invitación a realizar ese intento de diálogo físico-filósofo con los investigadores del IAC. También quiero agradecer a los asistentes a la mencionada charla sus numerosas sugerencias y comentarios, que he procurado tener en cuenta al redactar este artículo. Agradezco finalmente a Roberto Torretti su comunicación privada sobre los modelos cosmológicos de Eudoxo y Ptolomeo, que me ha resultado particularmente útil para la comprensión de dichos modelos.

description of a number of phenomena. For realism, such models are descriptions of the real nature of the universe. My aim is to show (through the consideration of some historical instances) a number of criteria that are useful to determine the plausibility of a realistic (respectively an instrumentalist) account of a given cosmological model. The discussion of such criteria makes it possible to outline an answer to the question concerning the realism (respectively instrumentalism) of the models of modern cosmology. Some aspects of this issue in the case of standard relativistic cosmology and quantum cosmology will be considered.

1. Introducción

«No es necesario que esas hipótesis sean verdaderas, o siquiera probables, sino que basta con que permitan cálculos conforme a las observaciones»

Andreas Osiander (*en el prefacio anónimo a la primera edición del «De Revolutionibus» de Copérnico*)

«[Los astrónomos ptolemaicos] tampoco han podido descubrir o deducir lo más importante, esto es, la forma del mundo y la simetría de sus partes»

Nicolás Copérnico (*en la dedicatoria del «De Revolutionibus» al papa Pablo III*)

Si consultamos el libro que marca el inicio de la cosmología moderna, el «De Revolutionibus» de Copérnico, en una edición que incluya el prefacio anónimo añadido por Andreas Osiander al texto de la primera edición de la obra (la de 1543), podremos asistir a la yuxtaposición, en un intervalo de pocas páginas, de dos concepciones radicalmente distintas del significado de los modelos cosmológicos: la concepción instrumentalista y la concepción realista.

La concepción instrumentalista, representada aquí por Osiander, sostiene que los modelos cosmológicos no son ni más ni menos que herramientas de cálculo, que permiten describir

una serie de fenómenos (en el ejemplo considerado, el movimiento aparente de los planetas y del Sol), pero que no poseen valor ontológico alguno. Cedámosle la palabra:

«[...] es deber de un astrónomo componer la historia de los movimientos celestes mediante la atenta y hábil observación. Luego, volviéndose a las causas de esos movimientos o hipótesis acerca de ellos, debe concebir y elaborar, puesto que no puede de ninguna manera alcanzar las auténticas causas, aquellas hipótesis que permitan calcular correctamente los movimientos a partir de los principios de la geometría, tanto para el futuro como para el pasado. El presente autor [Copérnico] ha realizado de manera excelente estas dos tareas. Porque estas hipótesis no necesitan ser ciertas o siquiera probables; si proporcionan un cálculo consecuente con las observaciones, eso sólo basta. [...] En cuanto a las hipótesis, nadie puede esperar nada cierto de la astronomía, que no puede proporcionarlo, a menos que se acepten como verdad ideas concebidas con otro propósito, y salga uno de su estudio como un idiota mucho mayor que cuando entró en él.»²

La concepción realista, mantenida, entre otros muchos, por Copérnico, sostiene por el contrario, que lo más importante de los modelos cosmológicos es que nos permiten llegar a conocer el modo de ser real del mundo (esto es, su estructura, sus dimensiones, y su dinámica). Es decir, lo más importante es que una buena descripción de los fenómenos conlleva la adecuación a la realidad de las hipótesis ontológicas asociadas a los modelos empleados. Por eso, al referirse Copérnico a los fallos de la cosmología ptolemaica en la dedicatoria del libro (al papa Pablo III), incluye las líneas siguientes:

«[Los astrónomos ptolemaicos] tampoco han podido descubrir o deducir lo más importante, esto es, la forma del mundo y la simetría de sus partes. Al contrario, la experiencia realizada por ellos ha sido como la de alguien que tomara de diversos lugares manos, pies, una cabeza, y otros miembros, muy bien trazados, puede ser, pero no para la representación de una misma persona; como tales fragmentos no se corresponderían unos con otros, lo que se compondría con ellos sería un monstruo más que un hombre. Por consiguiente, en el proceso de demostración o método

² Osiander, prefacio anónimo al «De Revolutionibus» (edición de 1543). Traducción tomada del libro de Arthur Koestler (1986): «Los sonámbulos. Tomo II ». (Barcelona: Biblioteca Científica Salvat) pp. 458-9.

—como se le denomina— se encuentra que aquellos que han empleado excéntricas o bien han omitido algo esencial, o bien han admitido algo extraño y completamente fuera de lugar. Esto no les hubiera ocurrido, de haber seguido principios seguros. Pues si las hipótesis asumidas por ellos no fueran falsas, todo lo que se sigue de sus hipótesis se confirmaría más allá de toda duda.»³

Instrumentalismo y realismo no son perspectivas específicamente asociadas a la cosmología. En realidad cualquier teoría científica es susceptible, en principio, de recibir una interpretación en una u otra clave. Pero la cosmología nos ofrece un ámbito especialmente propicio para el estudio del debate entre estas dos formas de entender la ciencia. Y esto por varias razones: La primera de ellas es que los modelos cosmológicos constituyen el terreno donde se planteó originalmente este debate, y donde se han conocido más episodios del mismo. Una segunda razón es que los modelos cosmológicos requieren la realización de extrapolaciones arriesgadas, y la asunción de supuestos difíciles de justificar, con lo que nos hallamos en un terreno favorable, de entrada, al instrumentalismo. Esta circunstancia (derivada de la doble imposibilidad de abarcar la totalidad del universo con la observación y de experimentar libremente con el cosmos, considerado como objeto de estudio) compensa, en parte, la tendencia al realismo que parece darse, de forma natural, en el común de los científicos (por lo que se refiere las entidades descritas por sus teorías)⁴. Lo cual, a su vez, permite realizar una valoración más objetiva de las ventajas e inconvenientes del instrumentalismo y el realismo. Por último, otro motivo para prestar atención al alcance ontológico de la cosmología nos lo proporciona el contenido mismo de esta materia. Puesto que lo que se trata de aclarar, en el debate en torno al realismo de la cosmología, es si el hombre posee la capacidad de acceder

³ Copérnico dedicatoria del libro «*De Revolutionibus*» al papa Pablo III. Mi traducción de la versión inglesa disponible en:

<http://webexhibits.org/calendars/year-text-Copernicus.html>.

Existe una edición castellana (de Carlos Mínguez y Mercedes Testal) del libro de Copérnico, publicada por la Editorial Nacional en 1982.

⁴ Esta abierta tendencia de la mayor parte de los científicos hacia el realismo con relación a las entidades descritas por las teorías exitosas es, por supuesto, compatible con las encendidas protestas de adhesión de algunos (o muchos) de ellos a alguna clase de empirismo, positivismo o incluso instrumentalismo. Semejantes protestas son abiertamente incoherentes con las declaraciones acerca de la «realidad» de tales o cuales partículas o campos (u otras entidades físicas inobservables) que menudean en los textos de los científicos supuestamente «positivistas». Pero se trata de una incoherencia tan frecuente como inofensiva, que quizás sea debida a la influencia, más bien superficial, que algunas corrientes en filosofía de la ciencia, o en epistemología, llegan a ejercer sobre espíritus naturalmente inclinados hacia el realismo.

mediante la razón, no ya a la estructura real de este o aquel objeto, sino a la estructura global del mundo del que forma parte. (Y no hará falta que me detenga a exponer la importancia de semejante conocimiento de cara a la obtención de una imagen general de la realidad, y de nuestro propio puesto en ella).

Las mencionadas razones justifican el interés de una reflexión particular sobre la interpretación realista y la interpretación instrumentalista de los modelos cosmológicos. Tal reflexión constituye el tema de este artículo. Y la pregunta que queremos responder es la siguiente: De estas dos posiciones (la realista y la instrumentalista), ¿cuál resulta más plausible en el contexto de la cosmología?

Para responder a semejante pregunta, habrá que ocuparse, aunque sea muy por encima, de algunos de los modelos cosmológicos que se han ido proponiendo a lo largo de la historia, con objeto de determinar qué factores favorecen una interpretación realista de los mismos, o una interpretación instrumentalista. Ahora bien, éste no va ser un artículo de historia de la cosmología. Nuestra reflexión (parcial) sobre dicha historia pretende simplemente dotarnos de una base desde la que afrontar la pregunta acerca de la cosmología física actual, que es la cuestión que nos interesa en realidad: ¿Qué es lo más razonable, en relación con los modelos cosmológicos actuales? ¿Considerarlos simplemente como ficciones útiles para unificar, en un marco general, la descripción de fenómenos tales como la radiación de fondo del universo y el corrimiento al rojo de los espectros galácticos? ¿O considerarlos, más bien, como una descripción (siquiera parcial y aproximada) de la estructura y la dinámica real del universo?

En consecuencia, el artículo va a estar dividido en dos grandes secciones. En una primera sección (que corresponde a los apartados 2, 3 y 4) buscaremos, sobre la base de algunos ejemplos históricos, una serie de criterios que nos permitan decidir qué rasgos de un modelo cosmológico dado nos inclinarán hacia una interpretación realista (o hacia una interpretación instrumentalista) del mismo. En una segunda sección (que corresponde al apartado 5) emplearemos los criterios encontrados para discutir qué tipo de planteamiento resulta más verosímil con relación a los modelos que se manejan en la cosmología contemporánea.

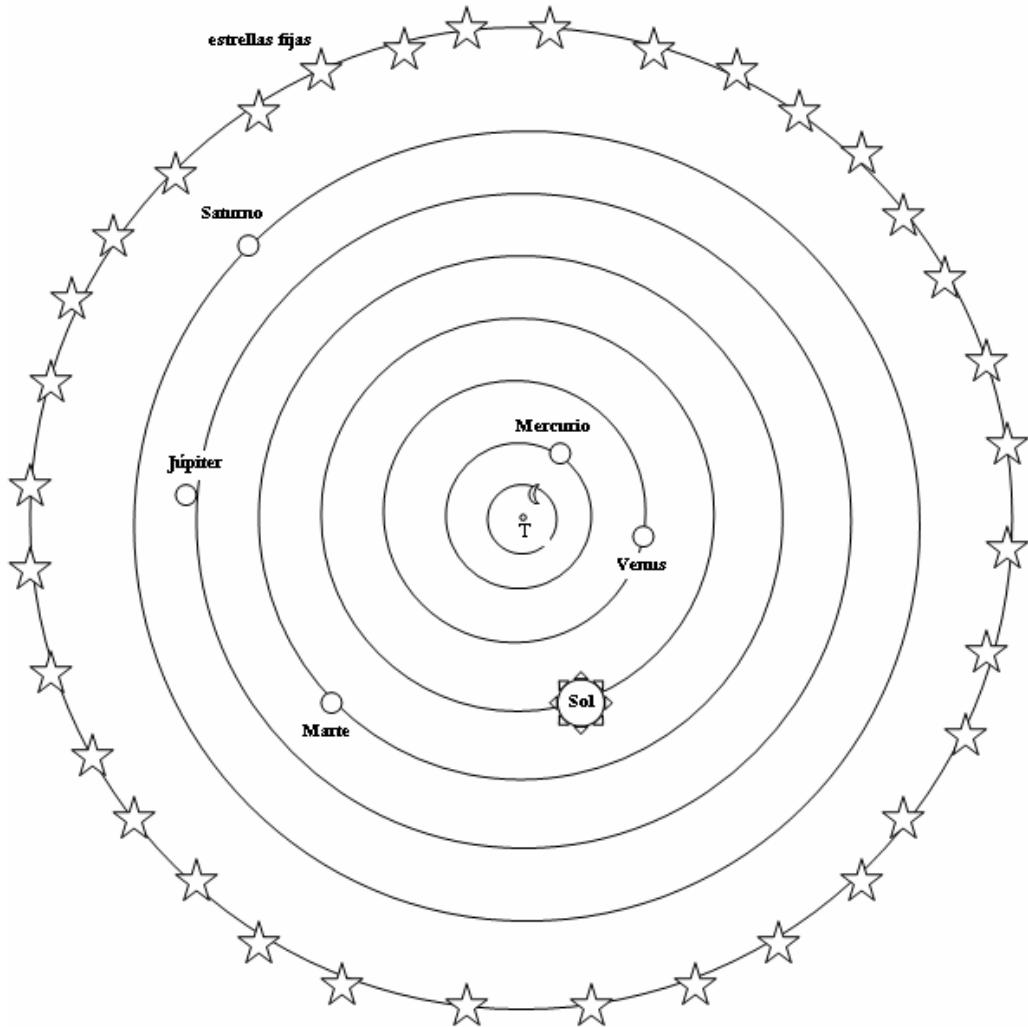
2. Algunos ejemplos de realismo e instrumentalismo en la historia de la cosmología

2.1 Cosmología pitagórica

Los primeros modelos cosmológicos de occidente están asociados con la escuela filosófica pitagórica (entre los siglos VI y V antes de Cristo). Nuestros conocimientos acerca de las doctrinas pitagóricas son muy fragmentarios. Pero sabemos que defendieron la esfericidad de la Tierra, la existencia de una esfera de las estrellas, como límite del universo, y la ubicación del Sol, la Luna y los planetas en el espacio intermedio entre la esfera estelar y la Tierra⁵. En todo caso, lo más importante aquí es llamar la atención sobre su apuesta teórica en relación con el movimiento del Sol y los planetas. Como es sabido, los movimientos que observamos de estos astros son muy complejos, y, en el caso de los planetas, muy irregulares también. Por otra parte, los pitagóricos, sobre la base de sus investigaciones matemáticas, y en particular del estudio de las proporciones numéricas, así como de sus indagaciones relativas a la importancia de dichas proporciones para la comprensión de la música⁶, habían llegado a la conclusión de que los fenómenos naturales (o al menos los más «nobles» de entre ellos) estaban regidos por relaciones entre números, que los dotaban de armonía. De ahí que postularan que las irregularidades observadas en el movimiento de los astros tenían que ser tan sólo aparentes, mientras que los movimientos reales serían sencillos, regulares y armónicos. ¿Qué tipo de movimientos podrían ser éstos? La respuesta de los pitagóricos (basada en la sencillez y uniformidad geométrica, pero también en la ya deducida esfericidad de la Tierra, y de la bóveda celeste) fue que se trataría de movimientos circulares, bien en torno a la Tierra, o bien, como propuso Filolao, en torno a un fuego central oculto para nosotros. Estos movimientos habrían de ser uniformes, de modo que la velocidad observada de los planetas se interpretaría como un indicio de su lejanía. Así llegamos al primer modelo cosmológico del pensamiento griego. Y el más fácilmente representable en una lámina:

⁵ Un buen estudio de la cosmología pitagórica —y, en general, de las diversas cosmologías desarrolladas hasta el siglo XVIII— lo encontramos en Rioja, A. y Ordoñez, J. (1999). La reflexiones de esta sección histórica del artículo se apoyan, en gran medida, en mi lectura de dicha obra. Consultese también Jacobsen (1999).

⁶ No olvidemos que fueron los pitagóricos los descubridores de los intervalos musicales básicos, y las armonías resultantes.



UNIVERSO PITAGÓRICO

No parece haberse dado ninguna discusión en la escuela pitagórica acerca de si habría que considerar este modelo (o el alternativo de Filolao, con el fuego central) como una descripción del universo real, o como una ficción útil para predecir los movimientos de los astros. (Aunque, teniendo en cuenta la escasa información que poseemos sobre los pitagóricos, no podemos excluir nada). Hay dos razones, bien distintas, que explicarían la ausencia del debate en este estadio inicial de la cosmología griega. La primera de ellas es que los pitagóricos en ningún momento pretendieron otra cosa que conocer la realidad. Ya hemos indicado que sus descubrimientos matemáticos, y de los intervalos musicales, les habían llevado al convencimiento de que los números gobiernan todas las cosas, y de que se da una armonía universal. De ahí que su cosmología no fuera sino la aplicación de esa

comprensión de la realidad al caso particular de los movimientos de los astros. Y una posición así difícilmente puede ser compatible con ningún tipo de instrumentalismo. La segunda (y contrapuesta) razón es que el modelo pitagórico del mundo resulta manifiestamente inadecuado para dar cuenta del movimiento de los planetas, por lo que no es preciso entrar en grandes discusiones acerca de su carácter realista o no. El problema de este modelo no es ni siquiera cuantitativo sino cualitativo. Es decir, no es que prediga con retraso (o con adelanto) los eclipses, o las conjunciones y oposiciones de los astros. El problema del modelo es que se pueden observar movimientos y propiedades de los planetas incompatibles con su validez. Por ejemplo los bucles que dichos astros describen en su recorrido por las constelaciones zodiacales, o también sus cambios de brillo (que se interpretan naturalmente como cambios en la distancia de los planetas a la Tierra)⁷:



TRAYECTORIA APARENTE DE UN PLANETA

No es preciso entrar en más detalles relativos a la fenomenología de los movimientos planetarios. En todo caso, este primer modelo cosmológico nos ha enseñado dos cosas: La primera es que se tenderá a interpretar de modo realista una cosmología, si ésta se ha obtenido extrapolando nuestros conocimientos en otras áreas, en las que consideramos que el enfoque realista es adecuado (en el caso de los pitagóricos el área que sirve de base es la música, con su explicación matemática). La otra enseñanza es obvia, pero quizás no esté de más el dejarla apuntada: La primera condición necesaria (aunque no suficiente, como veremos más adelante) para que se pueda interpretar realistamente un modelo es que resulte empíricamente adecuado (o, al menos, que se mueva en unos márgenes de error que nos permitan achacar la diferencia a fallos en las observaciones, o a efectos adicionales no considerados, pero de escasa relevancia).

El modelo pitagórico constituye por eso un primer ejemplo de cosmología concebida desde un enfoque realista, pero que no puede ser interpretada realistamente. Pasemos ahora a Platón.

⁷ El siguiente dibujo está adaptado de una lámina de Jacobsen (1999) pp. 39.

2.2 *La aportación de Platón*

La obra de Platón se desarrolla en los últimos años del siglo V y en las primeras décadas del siglo IV a.C. El pensamiento platónico abarca numerosísimos temas (desde el análisis del lenguaje a la teología, pasando por la ética, la estética, la política y la teoría del conocimiento), temas de los que, como es lógico, no nos vamos a ocupar aquí. Pero importa subrayar que este autor logra desarrollar una ontología que sirve de marco unitario para enfocar con detalle, y de un modo plausible, todos estos asuntos. De manera que, por primera vez en la historia de la filosofía, nos encontramos con la discusión detallada de múltiples aspectos de nuestra experiencia, realizada a partir de la aceptación de una serie de ideas generales acerca de la realidad.

De la ontología platónica, conviene traer aquí a la memoria tan sólo el planteamiento básico, es decir, la distinción entre el mundo de las ideas y el de la experiencia sensible. Para Platón, la realidad sensible, el objeto de nuestra experiencia ordinaria, es una especie de copia, o de sombra, de otra realidad más esencial, a la que denomina el mundo de las ideas. El mundo de las ideas es un mundo atemporal, estructurado, jerarquizado, dotado de proporciones y armonía, y, por tanto, plenamente inteligible. El mundo material, por su parte, es una copia del otro, pero es una mala copia, porque la materia (sobre la que ha de realizarse dicha copia) conlleva temporalidad, y un perpetuo moverse y transformarse unas cosas en otras. Este cambio continuo impide que se pueda hacer ciencia de lo material —Platón no trató nunca de formular una física—, salvo en los casos en los que los objetos sensibles transparentan algo de la belleza (es decir de la armonía, el orden, la simplicidad etc.) de los arquetipos ideales de los que se derivan. En tales casos, el lenguaje que permite expresar ese parentesco de los objetos sensibles con los arquetipos ideales es el lenguaje de las matemáticas.

Pues bien, precisamente los cuerpos celestes son de este tipo, de ahí que se pueda hacer una cosmología, y que haya que hacerla recurriendo a la aritmética y a la geometría. ¿Cómo hacerlo? Aquí, el planteamiento platónico es muy similar al pitagórico. Tanto los objetos celestes como sus movimientos han de ser descriptibles mediante figuras sencillas, y simétricas, que reduzcan al mínimo la posibilidad de cambio (haciéndolo lo más uniforme posible), ya que se trata de los seres sensibles menos sujetos a la esclavitud de la materia.

Ahora bien, la esfera y el círculo son las figuras (tridimensional y bidimensional, respectivamente) que cumplen estos requisitos en grado máximo. De ahí que, a partir de la concepción platónica de la naturaleza de los astros, puedan extraerse de modo natural los siguientes postulados:

1. «Tanto los cuerpos celestes como la Tierra tienen forma de esfera [...].
2. El cosmos tiene forma esférica y, por tanto, es finito.
3. La esfera de la Tierra se halla en el centro de la esfera cósmica.
4. Todos los movimientos celestes son circulares.
5. La velocidad angular [...] de los cuerpos celestes es invariable [...].
6. El sentido de los movimientos circulares planetarios es siempre el mismo; no hay inversiones de sentido»⁸.

El problema es que, si aceptamos este planteamiento, parece que tendríamos que terminar volviendo al modelo cosmológico pitagórico que, como ya hemos indicado, no resulta adecuado para explicar los movimientos planetarios. Pues bien, Platón fue consciente de este conflicto entre los datos empíricos y las exigencias teóricas de la cosmología de su época (o, más bien, de la cosmología ligada a su «línea de investigación»)⁹. Y de ahí que su aportación esencial al tema que estamos considerando fuera la formulación de lo que se ha dado en llamar el «problema de Platón», que ocuparía a todos los astrónomos a partir de entonces, y hasta Kepler y Newton. El problema cosmológico de Platón —como es característico de los problemas genuinos— puede plantearse en forma de una pregunta breve y precisa. En este caso, se trata de la siguiente:

«Cuáles son los movimientos circulares, uniformes y perfectamente regulares que conviene tomar como hipótesis a fin de salvar las apariencias presentadas por los planetas»¹⁰.

⁸ Rioja, A. y Ordoñez, J. (1999) 35-36.

⁹ Así, por ejemplo, puede leerse, en su última obra («Las Leyes») este pasaje:

«Es, en efecto, falsa, mis queridos amigos, esa creencia de que la Luna, el Sol y los demás astros andan a veces errantes; la verdad es todo lo contrario.

Cada uno de ellos, en efecto, recorre la misma ruta, no cambiante, sino circular y única, aun cuando parezca cambiante.» (822a)

Cito por la edición de 1990 de las obras completas de Platón en Aguilar (p.1412).

Platón mismo no proporcionó ninguna respuesta concreta a esta cuestión, si bien parece ser que apreciaba, ante todo, el modelo cosmológico propuesto por su discípulo Eudoxo, que vamos a mencionar seguidamente. Pero antes de hacerlo, conviene subrayar lo que la reflexión acerca del problema cosmológico de Platón puede aportar a nuestra discusión: Lo que nos muestra la consideración del enfoque platónico es que una ontología, o una visión del mundo —aunque no esté tan bien trabada como la ontología platónica— o incluso (más débilmente aún) un conjunto de postulados acerca de aspectos que se consideran parte del modo de ser de la realidad —aunque no se trate más que de aspectos parciales, que no dan lugar a una visión general del mundo— pueden motivar la elaboración de una cosmología que se ajuste a dicha ontología (o bien, al mencionado conjunto de postulados). En ese caso, si llega a elaborarse la cosmología buscada, se tiene una razón poderosa para interpretarla de un modo realista, siempre que se acepte como válido el planteamiento ontológico sobre el que se ha edificado, y en tanto en cuanto no choque abiertamente con los datos experimentales. O sea, que cuanto más ligado se encuentre un modelo cosmológico a una determinada ontología, mayor será la confianza (entre los partidarios de dicha ontología) en que se trata de un modelo realista. Y viceversa.

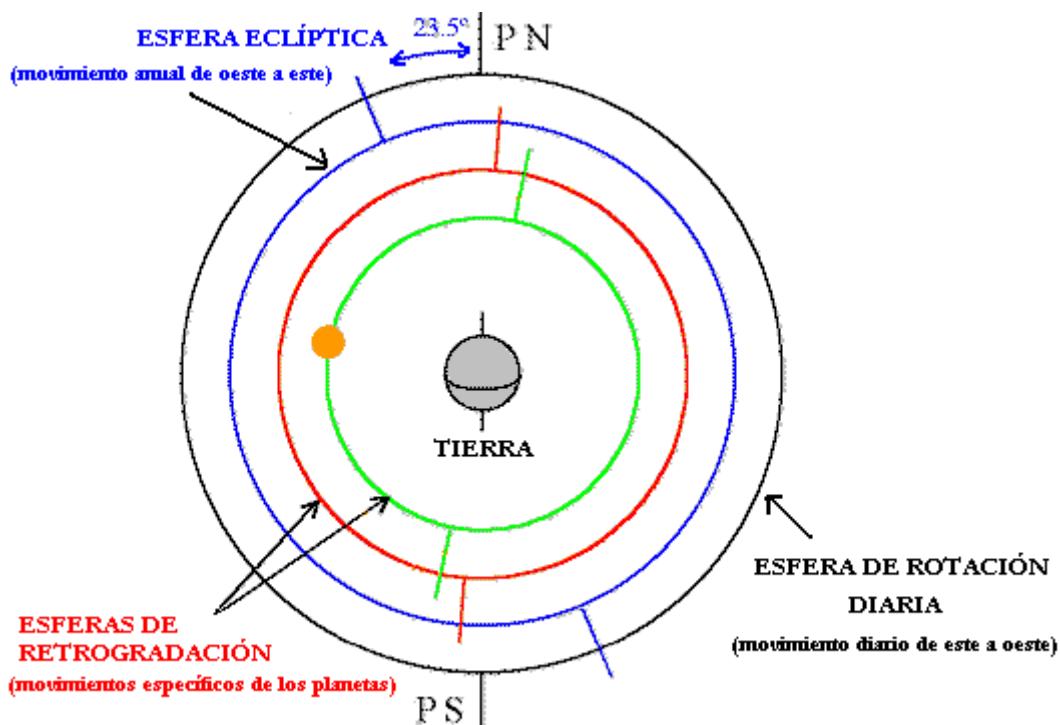
2.3. La cosmología de Eudoxo

Eudoxo de Cnido, nació en torno al año 400 a.C., y murió en torno al año 340 a.C. Fue discípulo de Platón en la Academia, y se especializó en geometría y astronomía. Eudoxo fue el primer autor conocido en plantear una solución concreta al problema cosmológico de Platón.

En pocas palabras, la propuesta de Eudoxo fue la de considerar que el movimiento de los astros (salvo el de las estrellas) viene determinado, no por una esfera, como se consideraba en el modelo pitagórico, sino por un conjunto de esferas. Algunas de las esferas asociadas a un astro determinado poseen ejes y movimientos idénticos a los de otras esferas asociadas a los otros astros¹¹. Pero cada astro tiene asociado, además de éstas, otras esferas, cuyos movimientos son diferentes, y cuyos ejes están orientados de modo diferente en el caso de cada astro. Esta composición de movimientos explicaría la compleja apariencia de las

¹⁰ Simplicio. Citado por Rioja y Ordoñez (1999) 38.

órbitas observadas. Una representación de las esferas asociadas a un planeta cualquiera puede hacerse como en el siguiente dibujo (que no precisa las inclinaciones concretas de las esferas, salvo la de la esfera eclíptica, que es la responsable del movimiento anual de los planetas, y la de la esfera de rotación diaria)¹²:



Eudoxo consideró que podría dar cuenta de los movimientos del Sol y de la Luna suponiendo que vienen determinados por tres esferas en cada caso. Asimismo propuso explicar los movimientos planetarios con ayuda de cuatro esferas rectoras por planeta. El modelo total contaba pues con 27 esferas móviles en torno a la Tierra (incluyendo la esfera de las estrellas).

Prescindamos de los detalles acerca de la disposición y el movimiento de cada una de estas esferas, y preguntémonos en su lugar, por las implicaciones ontológicas del modelo: ¿Qué resulta más plausible? ¿Interpretarlo como una descripción de la estructura real del cosmos, o como una herramienta de cálculo, destinada a describir los movimientos de los planetas?

¹¹ Éste es el caso de la esfera eclíptica, responsable del movimiento anual del astro, así como de la esfera responsable del movimiento diario.

¹² El siguiente dibujo está adaptado de una lámina en inglés disponible en la siguiente dirección de internet: <http://www-astronomy.mps.ohio-state.edu/~pogge/Ast161/Unit3/greek.html>.

La interpretación realista cuenta en su favor con el acuerdo del modelo de las esferas con el marco ontológico propuesto por Platón. Este acuerdo trae consigo que, en la medida en que consideremos verosímil la filosofía platónica —y éste es un resultado al que podríamos llegar partiendo de consideraciones sobre la ética, o sobre el arte, o sobre las matemáticas, el lenguaje etc.— nos inclinaremos a considerar también verosímil (y no sólo útil) la descripción del cosmos de Eudoxo.

En este punto, quizá convenga hacer un inciso para indicar que hay, al menos, dos interpretaciones realistas posibles del modelo de Eudoxo. Según la interpretación más usual, las esferas rectoras del movimiento de los astros consistirían en cuerpos materiales transparentes. Sólo la más inferior, de las correspondientes a cada cuerpo celeste, transportaría en su interior al astro correspondiente. Pero esta esfera estaría en contacto por los polos con la que la envuelve, y así sucesivamente¹³. Esta interpretación es, ya digo, la más común, pero no la única posible. Como alternativa, cabe suponer que las esferas rectoras son superficies geométricas sin realidad material. Teniendo en cuenta que estamos situados en un contexto platónico, en el que los objetos matemáticos poseen una realidad superior a los objetos materiales, no parece haber ningún inconveniente en aceptar esta alternativa. En palabras de Torretti:

«Para desempeñar su función en un modelo eudoxiano las esferas pueden ser superficies geométricas sin espesor y con el mismo radio. Pues no son vehículos portadores del cuerpo del planeta, sino figuras geométricas —o, mejor dicho, configuraciones cinemáticas— que permiten reconstruir la trayectoria efectiva, aparentemente irregular, de ese cuerpo como resultante de la ejecución simultánea de varios movimientos circulares uniformes en torno a un mismo centro.»¹⁴

De todos modos, cualquiera de las interpretaciones realistas del modelo cosmológico de Eudoxo tenía que hacer frente a una serie de dificultades, que finalmente llevarían a su abandono. Una dificultad interesante para nuestra discusión surgía de la discrepancia entre la descripción de Eudoxo de las trayectorias aparentes de los astros, y las trayectorias observadas ya en su época. No se trata de que la idea general de Eudoxo quedara así

¹³ Véase Rioja y Ordoñez (1999) 43.

¹⁴ Roberto Torretti (comunicación privada).

refutada empíricamente. En realidad, este modelo es susceptible de ser mejorado continuamente, en función de los datos empíricos de que se disponga. Sólo hay que añadir más y más esferas rectoras. En palabras de Torretti:

«Según un teorema matemático descubierto por Joseph Fourier a comienzos del siglo XIX, es posible representar de este modo con la aproximación que se quiera cualquier movimiento periódico de un punto sobre una esfera, por errático e irregular que parezca. Es cosa de multiplicar el número de esferas en rotación uniforme y elegir juiciosamente los parámetros del modelo. Un modelo eudoxiano con n esferas tiene $2n - 1$ parámetros ajustables, a saber, las n velocidades de las esferas y los $n - 1$ ángulos que hay entre los ejes de cada par de esferas sucesivas. Ya Calipo de Kyzikos, discípulo de Eudoxo, juzgó oportuno agregar dos esferas al modelo del Sol y otras dos al de la Luna, y enriquecer los modelos de Mercurio, Venus y Marte con una esfera cada uno.»¹⁵

Sin embargo, semejante procedimiento no está libre de problemas para el realismo. En primer lugar implica una enorme (y creciente) complejidad en la descripción del cielo. Una complejidad que casa mal con la idea de sencillez y armonía que el pensamiento pitagórico y platónico postulan para el estrato profundo de la realidad. ¿Cómo juzgar armoniosos los movimientos regidos por una infinidad de esferas, que poseen movimientos e inclinaciones diferentes (parámetros que, además, no parecen derivarse de ningún principio)? Y no sólo eso: Conforme vamos añadiendo esferas, para justificar movimientos particulares, la descripción de cada astro se va volviendo cada vez más y más distinta de la descripción de los otros. De modo que, en lugar de contar con un modelo unificado del cosmos como un sistema, lo que tenemos finalmente es un conjunto de reglas particulares (y ajustables sobre la marcha) para la descripción del movimiento de cada cuerpo celeste. Esta situación dificulta la interpretación realista de la cosmología de Eudoxo.

En definitiva, lo que podemos aprender del caso de la cosmología de Eudoxo para nuestra discusión es que la adecuación empírica de un modelo no basta para que pueda ser interpretado realistamente: Si esa adecuación sólo se obtiene a base de complicar enormemente la descripción, así como de ir introduciendo cada más y más parámetros

¹⁵ Roberto Torretti (comunicación privada). La observación original de la posibilidad de ajuste indefinido del modelo de Eudoxo podría deberse a Norwood Russell Hanson.

ajustables *ad hoc*, estos rasgos inclinan a uno a considerar que no estamos ante una descripción de cómo es en realidad el universo, sino ante una construcción de mero valor instrumental.

2.4 La física de Aristóteles y su importancia para la cosmología

Éste es el momento en que conviene hacer referencia a la aportación de Aristóteles al desarrollo de la cosmología. Aristóteles (contemporáneo y condiscípulo de Eudoxo en la Academia platónica, hasta la muerte de Platón) no sugirió propiamente un modelo cosmológico alternativo, sino que se limitó a modificar el de Eudoxo, introduciendo nuevas esferas, para que los movimientos celestes se ajustaran a las exigencias de su física. Pero la importancia de Aristóteles radica precisamente en esto: en que consiguió, por vez primera, formular una física capaz de explicar (cualitativamente, eso sí) los movimientos de todos los cuerpos materiales con ayuda de unos pocos principios y postulados. No podemos entrar aquí en los detalles de la física aristotélica. De ella tan sólo nos interesa resaltar el dato de que Aristóteles sostiene que todos los cuerpos materiales están compuestos de elementos, y cada uno de los elementos posee una forma natural de movimiento. Aristóteles postula la existencia de cinco elementos, pero los cuerpos celestes están compuestos de uno sólo de ellos, que no se combina con los demás, y cuyo movimiento natural es el circular. De ahí que los astros se muevan guiados por los movimientos circulares de las esferas celestes (que en el planteamiento de Aristóteles son esferas materiales). El movimiento natural de los demás elementos es rectilíneo, y el sentido es hacia arriba (en el caso de los elementos ligeros) o hacia abajo (en el caso de los elementos pesados). Con lo que se explica que la Tierra esté situada en el centro del universo.

Hoy en día, desde la perspectiva que nos ofrece la física moderna, resulta fácil menospreciar las explicaciones de la física aristotélica. Pero, en su momento, la enorme unificación y racionalización de las descripciones de los movimientos proporcionada por esta física supuso una verdadera conmoción intelectual. En todo caso, lo que nos importa aquí es que la física aristotélica proporcionaba una justificación de las líneas generales del modelo de las esferas celestes (modificado). La justificación del geocentrismo se hallaba en la pesantez de los elementos de la Tierra. Y la justificación de las esferas celestes se hallaba en que el movimiento natural del elemento celeste es el circular. Lo que a su vez se

justificaba porque este movimiento es el que menos cambio conlleva, por lo que es el más parecido a la inmovilidad del «motor inmóvil» (que es la causa final del movimiento del universo en la física aristotélica).

Así pues, encontramos, a partir de Aristóteles, un nuevo soporte para considerar que el modelo cosmológico de Eudoxo (modificado) constituye una descripción realista del universo: Este modelo es el que mejor se ajusta a la explicación física de los movimientos de los cuerpos. La enseñanza que de ahí se deriva, de cara a nuestra discusión, es evidente: Si un modelo del universo se apoya en (o mejor aún se deduce de) una teoría física exitosa y de carácter fundamental (esto es, aplicable a los objetos físicos en general), tal hecho induce a que consideremos el modelo como una descripción verosímil del universo, y no sólo como una herramienta de cálculo¹⁶.

Ahora bien, pese al soporte aristotélico, lo cierto es que pronto empezaron a buscarse alternativas a la cosmología de las esferas celestes. ¿Por qué? La razón hay que buscarla en la falta de adecuación de esta cosmología a las observaciones que se iban acumulando acerca del comportamiento de los objetos celestes.

Uno de los problemas más importantes era la denominada «anomalía zodiacal» del sol y los planetas, que no parecen recorrer con velocidad constante la eclíptica. Platón había postulado que los movimientos celestes son perfectamente regulares, de modo que era preciso dar cuenta de esta anomalía. Ni el modelo original de Eudoxo, ni su modificación aristotélica eran capaces de justificar la anomalía zodiacal (aunque ya hemos indicado que, añadiendo un número suficiente de esferas, se podría llegar a resolver este problema). Además, está el hecho de que los planetas cambian de brillo notablemente, a lo largo de sus movimientos. Una explicación natural de este cambio consiste en suponer que unas veces se encuentran más lejos y otras veces más cerca de la Tierra. Pero claro, semejante explicación no resulta compatible, ni con el modelo cosmológico de las esferas concéntricas, ni con la física de Aristóteles (Pues ¿cómo podrían ascender o descender los cuerpos celestes, con relación a la Tierra, si no están compuestos de elementos pesados ni ligeros?). Estas y otras dificultades motivaron la búsqueda de un modelo cosmológico que

¹⁶ Siempre y cuando consideremos que la teoría física que sirve de base al modelo cosmológico es interpretable realistamente. Pero la discusión acerca del realismo con respecto a las entidades postuladas por las teorías físicas fundamentales es compleja, y no podemos entrar en ella aquí. Como ejemplo, puede consultarse mi discusión de las interpretaciones realistas de la mecánica cuántica en Soler Gil (2003).

concordara bien con los datos empíricos relativos a los fenómenos celestes. Esta búsqueda dará lugar al modelo cosmológico ptolemaico.

2.5 *Cosmología ptolemaica*

La cosmología ptolemaica no fue obra de un sólo autor. Tal vez le convendría mejor el nombre de cosmología alejandrina, pues fue elaborada por una serie de astrónomos y matemáticos que trabajaron en el Museo de Alejandría desde el siglo III a.C hasta el siglo II d. C. El nombre de ptolemaica se debe a que la culminación y sistematización definitiva de este programa de investigación fue realizada por Claudio Ptolomeo (en el siglo II d. C.). La cosmología ptolemaica trata de ajustarse a las líneas generales, proporcionadas por Platón, acerca de cómo deben de ser los movimientos celestes. Pero, en lugar de considerar esferas concéntricas, describe las órbitas de los astros mediante la combinación de diversos movimientos circulares centrados en puntos diferentes. A este fin se introducen los círculos epicíclicos, deferentes (concéntricos y excéntricos) y ecuantes. Con ayuda de estas herramientas de cálculo, los alejandrinos fueron elaborando modelos particulares del movimiento de cada uno de los astros. Dichos modelos (en los que no vamos a entrar aquí, porque requeriría mucho tiempo el exponerlos bien) significaron la primera descripción de las trayectorias celestes verdaderamente ajustada a los datos experimentales, por lo que la cosmología ptolemaica se convirtió en el modelo cosmológico estándar hasta la publicación del «*De revolutionibus*» copernicano.

Ahora bien, la cuestión que nos interesa aquí es la de si cabe interpretar esta cosmología de manera realista, o si la interpretación instrumentalista resulta más verosímil. Pues bien, la respuesta a esta cuestión es que la interpretación instrumentalista del modelo ptolemaico cuenta con muchos más elementos en su favor que la alternativa realista.

Un realista podría aducir, si acaso, que, a fin de cuentas, los movimientos descritos por el modelo ptolemaico son circulares, tal y como la ontología platónica dice que tienen que ser. Pero pocas concordancias más pueden encontrarse entre la descripción alejandrina de los movimientos celestes y lo que cabía esperar de tales movimientos según el sentido común de la época, o según los postulados de Platón, o según la física de Aristóteles.

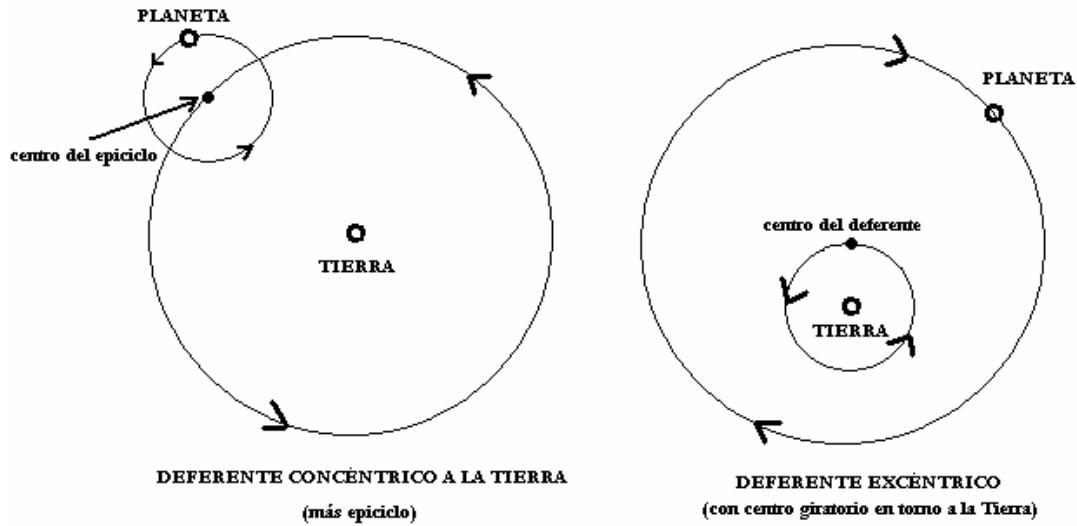
Platón había postulado (partiendo de consideraciones acerca de los movimientos más sencillos, simétricos y armónicos) que la velocidad con la que los astros recorren sus

movimientos circulares debía de ser uniforme. Pero he aquí que Ptolomeo se ve obligado a introducir en sus modelos planetarios el llamado círculo ecuante. Se trata de un círculo ficticio, centrado en algún punto en la recta que une el centro de la Tierra con el centro del círculo deferente del planeta que se considere. Ptolomeo sugiere que la velocidad angular de los planetas no es constante con respecto al centro de su círculo deferente, sino con respecto al centro de su ecuante. Esta maniobra equivale, de hecho, a renunciar al movimiento angular uniforme de los astros. De modo que, en tanto que se considere que el planteamiento platónico en relación con los movimientos celestes es el adecuado a la naturaleza de los astros (y esto se considerará así hasta Kepler), se tiene una buena razón para no interpretar realistamente el modelo ptolemaico. El choque de la cosmología alejandrina con la física de Aristóteles es aún más claro, puesto que, según Aristóteles la materia de los cuerpos celestes se mueve naturalmente en movimientos circulares centrados (sin ascensos ni descensos) en la Tierra. Esto no concuerda ni con los epículos, ni con las excéntricas de Ptolomeo y sus predecesores. De modo que, en tanto que se considere adecuada la física de Aristóteles, se tiene una razón muy poderosa para preferir una interpretación instrumentalista del modelo ptolemaico. Y, de hecho, esta fue la razón principal que motivó la desconfianza respecto a la verosimilitud de este modelo, incluso entre sus promotores.

Ya hemos indicado anteriormente que la física aristotélica supuso una commoción intelectual en el ámbito de la filosofía de la naturaleza. El atractivo de esta física era tal, que los propios autores de la cosmología alejandrina (y singularmente Claudio Ptolomeo) la aceptan (salvo desviaciones menores). Pero, como difícilmente se puede aceptar la verdad de dos concepciones incompatibles, esto llevó a muchos a la conclusión de que las descripciones mediante círculos no centrados en la Tierra no son más que herramientas de cálculo. Herramientas útiles para describir los fenómenos celestes, pero sin valor ontológico alguno. De hecho, este es el momento en el que la interpretación instrumentalista hace su aparición en la historia de la cosmología.

Pero aún hay más. Los astrónomos alejandrinos descubrieron que podían describir los mismos movimientos aparentes de los astros, mediante distintas combinaciones de círculos, como se muestra en el siguiente dibujo¹⁷:

¹⁷ Este dibujo está basado en una figura del libro Rioja y Ordoñez (1999) pp.68.



DOS DESCRIPCIONES EQUIVALENTES (SIMPPLIFICADAS) DEL MOVIMIENTO DE UN PLANETA

Esta situación plantea una dificultad notable para una interpretación realista del modelo. Porque, desde una perspectiva realista, una de las dos descripciones tendría que corresponderse a la órbita real del planeta, mientras que la otra no sería más que una ficción útil. Pero si las dos son empíricamente equivalentes. ¿Cómo decidir? Más aún, este ejemplo muestra que el éxito en la descripción de los fenómenos celestes observados no implica necesariamente una correspondencia del modelo con la realidad. En ese caso, ¿por qué insistir en que al menos una de las alternativas describe las órbitas planetarias reales?

Por si estas dificultades no fueran pocas, tenemos que mencionar todavía otra: La cosmología ptolemaica no caracteriza de un modo unitario los diversos planetas (y no digamos ya el Sol y la Luna), sino que la combinación de órbitas circulares que explica el movimiento de cada uno de los astros es diferente. De modo que, en resumen, tenemos un modelo del cosmos complejo, poco o nada unitario, que requiere la introducción *ad hoc* de numerosas figuras y parámetros sin razón aparente. Un modelo además incompatible tanto con el postulado platónico (muy natural, y aceptado generalmente en aquella época) de la uniformidad de la velocidad angular de los astros, como también con la física de Aristóteles. En estas condiciones, la opción por la interpretación instrumentalista del modelo parece obvia.

3. Criterios para decidir entre las interpretaciones realistas y las instrumentalistas de los modelos cosmológicos

A través de la exposición de los ejemplos del apartado anterior, han ido poniéndose de manifiesto algunos de los criterios a tener en cuenta de cara a responder a la cuestión concerniente al tipo de interpretación —realista o instrumentalista— más verosímil de un modelo cosmológico dado. Detengámonos un momento a enumerar esos criterios, que nos van a servir de base para el resto de la discusión.

Sentado que las predicciones del modelo se correspondan (dentro de un margen razonable de error) a los datos disponibles (correspondencia necesaria tanto para el instrumentalismo como para el realismo, aunque más para este último¹⁸), otros criterios decidirán sobre la plausibilidad del modelo de que se trate. Entre ellos se encuentra el de [1] la *relación del modelo cosmológico con las teorías físicas que se consideren fundamentales*. Cuanto más estrecha resulte esta relación, tanto más plausible se nos mostrará la interpretación realista de la cosmología. Asimismo hay que tener en cuenta los criterios de [2] *simplicidad* de las descripciones ofrecidas por el modelo, así como de [3] *unicidad* de estas descripciones. Descripciones complejas y que muestren poca unidad entre los diversos fenómenos abordados por el modelo, descripciones que incluyan un número elevado de parámetros ajustables según vayan llegando los resultados experimentales, pero cuyo valor particular no parezca obedecer a ninguna razón, nos invitarán a inclinarnos por una interpretación instrumentalista del modelo de que se trate. Por el contrario, las descripciones que logren unificar aspectos que, a primera vista, parecían independientes entre sí, si además incluyen pocos parámetros arbitrarios en comparación con la cantidad de fenómenos explicados, y, en general, suponen un marco sencillo para la comprensión de los fenómenos cósmicos, favorecerán una interpretación realista de la cosmología que sea capaz de proporcionarlas. Otro criterio a tener en cuenta será el de [4] la *existencia o no de modelos alternativos* empíricamente equivalentes y de igual (o similar) complejidad, pues la existencia de tales modelos favorece el escepticismo con respecto a la posibilidad de descubrir el modo de ser real del cosmos. Otro criterio a tener en cuenta será el de [5] la *compatibilidad del modelo con otros aspectos de la realidad*, más allá de los fenómenos de los que se propone dar cuenta. Estos

¹⁸ Puesto que un modelo instrumentalista puede contar con la obtención de resultados claramente erróneos, por lo que se refiere a un tipo de datos, siempre que el modelo sea capaz de predecir correctamente algún otro tipo de datos, que resulten de interés.

aspectos de la realidad pueden manifestarse a través de experiencias básicas, o pueden también venir implicados por una teoría ontológica que, por las razones que sean, se considere válida. Y, finalmente, un criterio que, por las limitaciones del espacio, no hemos tenido ocasión de ilustrar con ningún ejemplo, es el de [6] la *capacidad del modelo para predecir fenómenos que no se conocían con anterioridad* a la formulación del mismo. Es evidente que cuantos más fenómenos nuevos sea capaz de predecir un modelo, y cuanto más ajustada a la experiencia sea la descripción de que pueda realizar de dichos fenómenos, mayor será nuestra confianza en que se trata, no sólo de un modelo útil, sino, además, verosímil.

4. Otros ejemplos históricos

Una vez formulados estos criterios para decidir entre las interpretaciones realistas y las instrumentalistas de los modelos cosmológicos, lo más adecuado sería proseguir el análisis de los ejemplos históricos, para mostrar cómo las consideraciones anteriores han ido entrando en juego una y otra vez, permitiendo valorar el carácter de las diferentes propuestas cosmológicas. Pero este análisis ocuparía un espacio que no podemos concederle aquí. De modo que me conformaré con indicar seguidamente, algunos de los casos que podrían tomarse en consideración:

a.) *La cosmología copernicana*¹⁹: Copérnico interpretó su modelo de manera realista. Y tenía motivos para hacerlo, ya que permitía eliminar los ecuantes ptolemaicos, que chocaban contra la tesis ontológica, generalmente aceptada entonces, de la uniformidad de las velocidades angulares de los planetas. Más aún, el modelo de Copérnico permitía unificar la descripción de los movimientos de todos los planetas, y proporcionaba un criterio sencillo para calcular sus distancias relativas al Sol. Ahora bien, en contra de la interpretación realista de esta cosmología se hallaba su incompatibilidad manifiesta con la física de Aristóteles. Copérnico trató de salvar esta dificultad modificando algunos puntos concretos de dicha física, pero tales maniobras no resultaban muy convincentes. Por eso, el que creyera que el modelo copernicano era, no sólo útil, sino también verdadero, tendría que

¹⁹ Una buena exposición de la cosmología copernicana se encuentra en Rioja y Ordoñez (1999) cap.2. Véase también p.e. Carrier (2001).

rechazar la física de Aristóteles y construir otra, acorde con el copernicanismo. Esta fue, como se sabe, una de las motivaciones principales de Galileo.

b.) La cosmología newtoniana: La obra de Newton supone la culminación de la construcción de una nueva física, capaz de sustituir ventajosamente a la de Aristóteles. ¿Podría deducirse un modelo cosmológico de esa física? Sí, como han mostrado en el siglo XX Milne y McCrea²⁰. Pero el caso es que ni Newton ni nadie en su época trató de desarrollar esa cosmología. ¿Por qué? Porque tal cosmología no hubiera resultado compatible con el postulado ontológico de eternidad e inmutabilidad del universo a gran escala, que se admitía en aquella época. De modo que no parecía posible obtener un modelo realista del universo, en el marco de la física de Newton. En ese punto formuló Kant su rechazo a la cosmología como ciencia, un rechazo basado en su idea de que el universo como un todo no podía ser objeto de la experiencia. Y este fundamento teórico de la imposibilidad de la cosmología, junto con la dificultad que acabo de mencionar con relación a la inmutabilidad del cosmos, motivaron un desinterés generalizado hacia la cosmología hasta Einstein.

c.) El debate entre los partidarios del modelo del Estado Estacionario y los partidarios del modelo de la Gran Explosión²¹: Como es sabido, el debate se decidió empíricamente, sobre todo a causa del descubrimiento de la radiación de fondo del universo, pero también por otros descubrimientos, como el de la desigual distribución temporal de las radiofuentes extragalácticas, etc. Pero un análisis del debate puede mostrar que algunos de los criterios espuestos en el apartado anterior (simplicidad, relación con la física conocida, etc.) jugaron un papel muy importante en la discusión de los méritos de estos dos modelos. Por lo demás, es evidente que el debate entre los partidarios del modelo del estado estacionario y los partidarios del modelo de la Gran Explosión no hubiera tenido ningún sentido, si se hubieran enfocado estos modelos desde un punto de vista meramente instrumentalista.

²⁰ La cosmología newtoniana desarrollada por Milne y McCrea suele encontrarse en los manuales de cosmología física, como aproximación de la dinámica relativista del cosmos. Véase p.e. Schneider (2006) pp. 146-148.

²¹ Un buen análisis de este debate puede encontrarse p.e. en Kragh (1996).

5. Realismo e instrumentalismo en relación con los modelos actuales del universo

Llegamos por fin al núcleo de este artículo. Tenemos que preguntarnos si resulta plausible considerar los modelos cosmológicos que se manejan actualmente como una caracterización (todo lo aproximada e incompleta que se quiera) del modo de ser real del universo, considerado como un todo, o si, por el contrario, lo razonable es considerar que tales modelos son meras herramientas de cálculo que permiten relacionar la descripción de una serie de fenómenos, en apariencia independientes.

5.1 *¿Constituye el modelo de la Gran Explosión una descripción realista del universo?*

Comencemos por la cosmología de la Gran Explosión²², que supone el modelo cosmológico estándar hoy en día. ¿Constituye o no constituye una descripción realista del universo, de su historia, de sus propiedades y de sus dinamismos a gran escala? Para responder a esta pregunta es preciso hacer referencia brevemente a algunos puntos de este modelo, que pueden resultar relevantes para nuestra discusión:

En primer lugar hay que recordar que, aunque por sencillez nos refiramos en singular a la cosmología de la Gran Explosión, no se trata en realidad de un sólo modelo, si no de una familia de modelos, ya que, hasta ahora, los parámetros que determinan la dinámica del universo en este marco no han podido ser medidos con la suficiente precisión como para poder descartar versiones del *big bang* cualitativamente diferentes en ciertos aspectos.

El modelo de la Gran Explosión parte de las ecuaciones de campo de la teoría de la relatividad general de Einstein. Estas ecuaciones caracterizan la forma del espaciotiempo asociado a un determinado sistema material, y pueden aplicarse en principio también al sistema de toda la materia, al universo. Las ecuaciones resultantes son resolubles, siempre que se adopten algunas hipótesis, lo suficientemente sencillas, sobre la distribución de la materia a gran escala. Si se supone que el universo a gran escala es homogéneo e isótropo, y que, por consiguiente, el espaciotiempo asociado a tal sistema tiene que poseer en cada punto simetría esférica, se obtienen, a partir de las ecuaciones de campo de Einstein, las llamadas ecuaciones de Friedmann. Dichas ecuaciones, junto con alguna ecuación de estado, determinan la dinámica del universo. Los parámetros contenidos en estas

²² Hay muchas buenas exposiciones del modelo cosmológico de la Gran Explosión. Véase por ejemplo Schneider (2006) cap.4, y Börner (1996) pp.48-110.

ecuaciones (tales como p.e. la densidad del universo, la constante cosmológica, el radio de curvatura, la constante de Hubble, etc.), son los magnitudes fundamentales de la cosmología actual. Las distintas soluciones a las ecuaciones de Friedmann proporcionan los posibles historias del universo en la cosmología relativista. La más famosa de estas soluciones es la de Lemáître, que fue el primer autor que sugirió la idea de la Gran Explosión en el origen del universo. Pero puede mostrarse que, partiendo de supuestos muy plausibles acerca del valor mínimo de la suma de la presión y la densidad del fluido cósmico, cualquier solución de las ecuaciones de Friedmann incluye una singularidad (o estado de infinita densidad) en el pasado, y una expansión del universo a partir de dicha singularidad inicial.

Teniendo en mente estas líneas generales del modelo de la Gran Explosión, preguntémonos de nuevo, ¿puede considerarse que este escenario describe realistamente nuestro universo?

En un sentido trivial, está claro que el realismo del modelo de la Gran Explosión no puede ser completo, ya que, de otro modo, el universo consistiría en un fluido sin irregularidades. Semejante escenario tiene poco que ver (afortunadamente) con nosotros y nuestro entorno, pues desde los granos de arena hasta los supercúmulos de galaxias todo son irregularidades. Pero tal limitación del modelo no es decisiva (y yo diría que no es ni siquiera relevante). En realidad, todas las descripciones son limitadas, y sería iluso pretender dar cuenta de la realidad con absoluta fidelidad. Tampoco puede una descripción anatómica detallar la posición de los átomos que componen el cuerpo descrito, y no por ello parece necesario renunciar al realismo en anatomía. La cuestión relevante aquí es la de si cabe considerar la hipótesis de que el universo consiste en un fluido homogéneo e isotropo como una suposición aproximadamente válida, cuando se considera el cosmos a escalas lo suficientemente grandes. Sobre este particular hay que decir que, en la actualidad, el postulado de homogeneidad e isotropía del universo concuerda bien con las observaciones. En concreto, hay dos tipos de observaciones que refuerzan nuestra confianza en dicho postulado: por un lado, la isotropía de la radiación cósmica de fondo, y, por otro lado, el hecho de que no se encuentren agrupaciones de galaxias de escalas mucho mayores que los 100Mpc (ya que esta escala es aún pequeña, en comparación con el volumen que se obtiene a partir de la longitud de Hubble (una longitud de unos 3000 Mpc, más o menos)).

Ahora bien, la referencia a estos datos nos muestra una vía por la que se podría llegar a poner en duda el realismo del modelo estándar del universo: Si se encontraran estructuras cósmicas a todas las escalas observables, o si la discrepancia entre la isotropía del universo, según la radiación de fondo, y el tamaño de las estructuras observadas resultara muy difícil de explicar. (Hasta ahora se conoce que existe una cierta discrepancia en este sentido, pero se piensa que es justificable con el recurso a la materia oscura del universo, sobre la que aún diremos algo en este apartado). No está claro que el descubrimiento de anomalías de este tipo fuera suficiente para refutar el modelo cosmológico estándar, habida cuenta de que nadie tira un traje viejo si no tiene otra cosa que ponerse. ¿Cabría construir otra cosmología, que conservara todas las ventajas explicativas del modelo de la Gran Explosión, y no necesitara el postulado de homogeneidad e isotropía del universo? Puede ser. Pero, entretanto, lo normal sería que se mantuviera el modelo, y se ajustara introduciendo algún parámetro que diera cuenta de las irregularidades. Cuantas más veces se realizase una maniobra de este tipo, más nos inclinaríamos a interpretar a la manera instrumentalista esta cosmología.

[Pregunta: ¿No podría interpretarse como un paso en este sentido la introducción de la «materia oscura»? Posiblemente la respuesta dependa de si cabe o no proporcionar una base física al postulado de esta materia, y si se puede llegar a tener algún tipo de evidencia de la existencia de la misma, independiente de consideraciones cosmológicas. Esto no es obvio, sobre todo teniendo en cuenta que se calcula que el 90% de esa materia oscura no es bariónica].

Esta discusión en torno al postulado de homogeneidad del universo tiene que ver con uno de los criterios que consideramos anteriormente para decidir si un modelo podía interpretarse de modo realista o no. Se trata de comprobar si el modelo choca con algún aspecto conocido de la realidad. Por lo que se refiere a la existencia de anisotropías en el cosmos, no parece (de momento) que la escala de las mismas sea suficiente como para considerar que se da este choque. Pero hay otros criterios sobre el realismo que conviene también tener en cuenta. Por ejemplo, los de simplicidad y unicidad de la descripción resultante del cosmos. Dichos criterios los cumple la cosmología de la Gran Explosión de una forma muy marcada. En cuanto a la simplicidad, no hace falta más que recordar que bastan el parámetro de densidad y la constante cosmológica para determinar la forma

global del universo, según esta cosmología. Asimismo basta la constante de Hubble para determinar la escala del universo. Y, en general, cabe decir que el modelo describe un gran número de observaciones, de tipos muy diversos, por medio de un formalismo poco aparatoso. Igualmente, por lo que se refiere a la unicidad en la descripción, el modelo de la Gran Explosión no presenta inconvenientes: no podemos descomponer esta cosmología en un conjunto de reglas independientes unas de otras para la descripción de fenómenos particulares, sino que el modelo nos presenta un universo de dinamismo unificado, y nos muestra además la conexión entre fenómenos a primera vista desligados (como la radiación cósmica de fondo, la proporción de helio en las nebulosas poco metálicas, y el corrimiento al rojo de las galaxias).

Estas características (unicidad en la descripción y simplicidad) favorecen una interpretación realista del modelo estándar del universo. Pero la consideración de este punto nos puede servir también para mostrar qué tipo de desarrollos llevarían a valorar más la interpretación instrumentalista. Pues, como hemos indicado, el modelo depende de una serie de parámetros, cuyos valores hay que determinar. Ahora bien, la determinación de estos valores podría traer consigo conflictos que llevaran a poner en duda el realismo de la cosmología construida sobre tales elementos. Por ejemplo, actualmente se considera que la edad del universo, calculada a partir de la constante de Hubble, es del mismo orden que la edad de las estrellas en los cúmulos globulares de las galaxias. Este resultado es positivo, desde el punto de vista realista, ya que sugiere que existe verdaderamente una conexión entre un parámetro calculado a partir de los desplazamientos al rojo de las galaxias —y que el modelo nos dice que sirve para calcular la edad del cosmos— y la edad de los objetos más antiguos que conocemos. Pero ¿qué ocurriría si estimaciones más precisas de la constante de Hubble, y de la edad de los cúmulos globulares, concluyeran que éstos son más viejos que el universo? Seguramente, este hecho no constituiría por sí sólo una refutación del modelo estándar. Puesto que los méritos de esta cosmología seguirían estando ahí, y podrían buscarse diversas explicaciones del valor discrepante. Lo más fácil sería que estas explicaciones dieran lugar a la introducción de nuevos parámetros que permitieran rectificar la edad calculada del universo. Pero, por esta vía, el modelo iría perdiendo simplicidad, y comprometiéndose con postulados concebidos sin otro fin que el de ajustar los resultados experimentales a nuestras expectativas previas. Y ésta es la ruta más segura para terminar pasando de una interpretación realista a una interpretación instrumentalista de un modelo cosmológico.

Lo mismo puede decirse si consideramos la cuestión de la constante cosmológica. Esta constante tuvo un origen bastante dudosos (al menos si la consideramos desde la perspectiva realista) ya que Einstein la introdujo sin más fundamento que la pretención (ociosa, a la vista del desarrollo posterior de la cosmología) de obtener un modelo cosmológico estático. Pero, dejando al margen su desafortunada entrada en escena, en la actualidad se la concibe como un parámetro que expresa la densidad de energía del vacío, y que debe resultar de la suma de las contribuciones de diversos campos energéticos (el campo electromagnético, los campos de Higgs asociados con la fuerza débil, el campo *inflatón* postulado por la cosmología inflacionaria, el campo *dilatón* postulado por la teoría de supercuerdas etc. etc.). Un hecho cierto es que nadie sabe, hoy por hoy, cuántas contribuciones hay que tener en cuenta, y cómo se calcula la suma. Y otro hecho cierto es que, cuando la observación de supernovas en galaxias con elevado corrimiento al rojo, a finales de los años noventa, sugirió que el universo se está acelerando, lo primero que se hizo fue explicar los datos recurriendo a la constante cosmológica. No digo que esto no se pueda hacer. Pero, claro, hay que tener en cuenta la posibilidad de que este u otros parámetros del modelo de la Gran Explosión acaben convirtiéndose en algo similar a los círculos de Ptolomeo, que se podían ir modificando y adaptando a cualquier cosa. De hecho, hay quien sugiere ya que consideremos que la constante cosmológica no es una constante, sino que se trata de una función del tiempo... lo que deja las manos aún más libres para ajustes de todo tipo.

Dejemos aquí la discusión de la simplicidad del modelo cosmológico estándar. Pues hay otros criterios sobre el realismo de los que también conviene hablar. Uno de ellos es el de la capacidad predictiva de fenómenos que no se conocían con anterioridad. Se trata de un criterio de gran importancia, ya que la capacidad de predecir cosas nuevas constituye una de las características que más refuerzan la confianza en que nos encontramos ante una descripción realista del mundo. Por lo que a este criterio respecta, es sabido que el modelo estándar ha realizado algunas predicciones exitosas. Las más espectaculares son seguramente la de la existencia de una radiación de fondo cósmica, que se considera un remanente de la Gran Explosión, así como la predicción de la proporción correcta de helio ($\sim 25\%$) en las nebulosas pobres en elementos metálicos. Esta última predicción se encuentra permanentemente sometida a prueba: Si se hallara una nebulosa pobre en metales y con una proporción de helio mucho menor que el 25%, este resultado sería difícil

de explicar desde el modelo estándar. Otras predicciones sometidas a una prueba continua (y que son por ello importantes, aunque no se refieran a fenómenos completamente desconocidos con anterioridad a la formulación del modelo que estamos discutiendo) son, por ejemplo, la no existencia de clases de neutrinos con masa en reposo superior a los 100eV, o la predicción de la no existencia de fuentes con líneas de emisión que muestren un corrimiento al rojo muy inferior al de sus líneas de absorción, o la no existencia de estrellas de una edad superior a los 20.000 millones de años. El hecho de que estas predicciones resulten una y otra vez confirmadas, contribuye a afianzar la idea de que algo debe haber de cierto (y no sólo de útil) en el modelo estándar. Y viceversa, si empezaran a aparecer contraejemplos, seguramente no derribarían a la primera dicho modelo, sino que, más bien, se buscarían explicaciones que permitieran ajustar la cosmología a los datos empíricos. Pero estos reajustes irían complicando el modelo, y minando nuestra confianza en una interpretación realista del mismo.

Otro criterio para juzgar la plausibilidad de una interpretación realista de los modelos cosmológicos es su concordancia con el marco que constituyen las teorías físicas que se consideren fundamentales. Sobre este punto no me voy a extender, porque parece evidente que se da la concordancia requerida. Otra situación surgiría por ejemplo si, para justificar algunos resultados experimentales problemáticos, comenzaran a introducirse parámetros o fuerzas en el modelo sin base aparente en la física conocida. Tal vez pueda considerarse que hay algo de esto en la variante inflacionaria del modelo estándar, pero de ese asunto me voy a ocupar en la sección siguiente.

Si acaso, cabe recordar aquí que la teoría física más estrechamente ligada a la cosmología de la Gran Explosión es la teoría general de la relatividad. Ahora bien, es conocido que el modo de entender la realidad física que se deriva de la teoría de la relatividad es esencialmente diferente del que se deriva de la teoría cuántica. Este conflicto en la física podría llegar a suponer una seria dificultad para la interpretación realista del modelo de la Gran Explosión. La razón es que actualmente se trabaja en el desarrollo de una teoría cuántica de la gravedad, y, si al final resultara que la gravedad es de naturaleza cuántica, esto traería consigo la necesidad de elaboración de una cosmología cuántica, que sustituyera al modelo cosmológico estándar. Si acaso, el modelo de la Gran Explosión podría considerarse como una aproximación a la descripción fundamental del cosmos; una aproximación válida para escalas temporales por encima de la era de Planck, y para la

descripción de determinados estados del universo. Pero de este asunto me voy a ocupar al final del artículo.

No quiero terminar la discusión del modelo cosmológico estándar sin volver a considerar el criterio de la compatibilidad del modelo con otros aspectos de la realidad; un criterio al que ya hemos hecho referencia con relación al asunto de la homogeneidad del universo. La razón de volver a este criterio es que creo conveniente mencionar un tema al que no se le suele prestar la atención que debiera: el de la compatibilidad de nuestras teorías físicas más recientes con la experiencia de la temporalidad²³. Es un hecho el que, en nuestra experiencia ordinaria, experimentamos vivamente la diferencia entre pasado, presente y futuro. Es también un hecho el que, de estos tres modos temporales, el presente parece ir asociado de un modo especial con la existencia: lo pasado ya no existe, y lo futuro no existe todavía. Sólo el presente parece ser real. A estas experiencias básicas acerca del tiempo se suman otras que fácilmente pueden pasar desapercibidas por ser tan obvias. Una de ellas es que el tiempo transcurre ordenadamente. Es decir, que las distintas escenas que constituyen nuestra vida no se suceden aleatoriamente. Otra experiencia básica es la de que esta sucesión de escenas siempre va del pasado al futuro. Es lo que se denomina la flecha del tiempo.

Pues bien, todos estos fenómenos se han venido entendiendo, a lo largo de la historia de la filosofía, como indicios de la existencia de un devenir absoluto de la realidad física. El postulado de este devenir absoluto explica la diferencia entre pasado y futuro, la ligadura esencial del presente a la existencia, y los diversos aspectos asociados con la sucesión temporal (dirigida y ordenada). A esta teoría del tiempo se la denomina ahora «teoría presentista» o «teoría A» del tiempo. Y puede decirse que prácticamente todo el mundo la daba por válida hasta la aparición de la teoría especial de la relatividad.

Ahora bien, desde la formulación de la teoría especial de la relatividad, sobre todo en la versión de Minkovski, hay un número creciente de autores que considera que el presentismo no puede ser válido, y que la relatividad nos obliga a considerar la existencia como algo esencialmente atemporal. Según estos autores, no podemos ligar la existencia al momento presente, porque el presente (si lo consideramos a partir de la relación de

²³ Una autor muy recomendable para introducirse en el estudio de este tema, y, más generalmente, en la discusión acerca de las diferentes teorías del tiempo es William Lane Craig. Consultense en particular sus obras Craig (2000a), Craig (2000b), Craig (2001a) y Craig (2001b).

simultaneidad) —como también el pasado, y el futuro— es relativo a la elección de un sistema de referencia desde el que observar los sucesos. De modo que —así se nos dice— habría que considerar que el universo existe como un bloque, atemporalmente, mientras que las diferencias entre presente, pasado y futuro constituirían aspectos subjetivos, derivados de nuestra perspectiva,... o incluso ilusiones.

No puedo aquí entrar en los detalles de la discusión entre los partidarios de la teoría presentista (tradicional) del tiempo, y los partidarios del universo bloque, porque se requeriría mucho espacio²⁴. Baste decir que, en mi opinión, no existe ninguna alternativa al presentismo capaz de explicar convincentemente los aspectos de la temporalidad a los que he hecho referencia al comienzo de esta reflexión. De ahí mi sospecha de que una teoría física, o un modelo cosmológico, que no deje sitio a la idea del devenir absoluto del mundo en el tiempo, deja fuera un aspecto esencial de la realidad física, y difícilmente podrá ser tomado como una descripción verosímil de esa realidad.

¿Hay que pensar, por tanto, que la teoría de la relatividad es una teoría instrumentalista? No necesariamente. Es cierto que parece sugerente interpretar la relatividad en términos del universo bloque, y que esta interpretación no resulta fácil de compatibilizar con una parte importante de nuestra experiencia. Pero también hay varias alternativas para sostener el presentismo en el marco relativista. Una de ellas es simplemente considerar que, aunque todos los marcos de referencia parezcan iguales, hay uno de ellos privilegiado, que determina los planos de simultaneidad que corresponden al devenir absoluto del mundo. Ésta es, en esencia, la versión de la relatividad de Lorentz. Ciertamente, un planteamiento así no resulta muy atractivo, si nos atenemos tan sólo a la relatividad restringida. Ahora bien, cuando pasamos a considerar el caso de la relatividad general, la cosa cambia. Y cambia porque ahora nos encontramos con que determinados tipos de espaciotiempo admiten globalmente una partición natural y única en planos de simultaneidad.

Pues bien, precisamente las soluciones a las ecuaciones de Friedmann son de este tipo. De manera que el modelo estándar de la cosmología nos permite atisbar un modo de compaginar nuestra experiencia de la temporalidad con la descripción física del mundo: El tiempo universal asociado con la expansión del universo manifestaría también el devenir absoluto del cosmos. Este aspecto de la cosmología de la Gran Explosión me parece uno

²⁴ Consultense al respecto las obras de Craig mencionadas en las referencias del artículo.

de los que más alientan a considerar dicha cosmología como una descripción realista del universo.

Con esto, creo que ya nos hemos detenido suficientemente en la consideración del modelo cosmológico de la Gran Explosión. Si hacemos un balance de los pros y los contras de la interpretación realista y la interpretación instrumentalista de esta cosmología, parece razonable sostener que, dado el estado actual de nuestros conocimientos, la interpretación realista de la misma resulta más verosímil que su oponente. Que lo siga siendo o no, dependerá de si llegan a darse, o no, alguno de los desarrollos negativos para el realismo a los que he ido haciendo referencia en este apartado.

5.2 *Cosmología inflacionaria*

Pasemos ahora a referirnos brevemente a una familia de modelos que pueden considerarse como una variante, o como una extensión, de la cosmología estándar. Me estoy refiriendo a la cosmología inflacionaria²⁵. El primer modelo inflacionario lo propuso Alan Guth en 1981. Lo que Guth pretendía era explicar dos fenómenos y un «no-fenómeno» sobre los que el modelo cosmológico estándar no dice nada: Los dos fenómenos son (1) la homogeneidad de regiones del universo que no han podido interactuar [el denominado *problema del horizonte*] y (2) el hecho de que el universo parece ser aproximadamente plano, lo que indica que, en los primeros momentos de la expansión, el parámetro de densidad total del universo debió de poseer un valor extremadamente cercano a la densidad crítica [el denominado *problema de la planitud*]. El no-fenómeno es la ausencia de monopolos magnéticos y otras entidades anómalas predichas por las teorías de la gran unificación. Estos monopolos deberían de haberse producido en el momento de la ruptura de simetría que condujo a separación de las fuerzas fuerte y electrodébil, pero no se observan.

Guth propuso que, en un periodo de tiempo entre los 10^{-37} y los 10^{-35} segundos después de la Gran Explosión, tuvo lugar un proceso de expansión exponencial del universo. La razón de este proceso, según la propuesta inicial de Guth, se hallaría en el campo de Higgs

²⁵ Acerca de la cosmología inflacionaria consultese p.e. Brandenberger (1999). Una exposición concisa de las líneas generales de la hipótesis inflacionaria (y sus problemas) se encuentra en Mosterín y Torretti (2002) pp. 293-294. El esbozo de la cosmología inflacionaria en este apartado se basa, sobre todo, en este último texto.

Φ de una determinada versión de la teoría de la gran unificación. El potencial de este campo $V(\Phi)$ actuaría, durante el periodo indicado, como una constante cosmológica que aceleraría enormemente la expansión del universo. Al finalizar este periodo, la inflación dejaría paso a una expansión como la descrita por el modelo estándar, que continuaría, por ello, siendo válido, salvo por lo que respecta a los primeros estadios del universo.

El escenario de la inflación ofrece una respuesta a los tres puntos indicados anteriormente. El problema del horizonte se resuelve porque todo lo que hoy constituye el universo observable proviene de una pequeña región que se encontraba en interacción con anterioridad a la fase expansiva exponencial. El problema de la planitud se resuelve en el sentido de que, debido a la inflación, el universo ha alcanzado unas dimensiones tales que, aun cuando posea alguna curvatura, aparenta ser prácticamente plano. Y la expansión exponencial barre de nuestro horizonte los monopolos magnéticos, y otros monstruos inobservados pero previstos por las teorías de la gran unificación.

Aparte de estas funciones iniciales de la inflación, hoy se busca en el modelo inflacionario una justificación de las fluctuaciones de la radiación cósmica de fondo. Pero estos detalles no son relevantes para nuestra discusión. Sí que lo es, en cambio, el hecho de que fracasara el intento inicial de Guth de asociar la inflación con un campo proveniente de la física de partículas. El fracaso fue debido a que el potencial postulado daba lugar a un universo demasiado inhomogéneo. La hipótesis de la inflación se ha seguido manteniendo, de todos modos, pero ya sin asociar el campo «inflatón» con ningún resultado de otras ramas de la física. Se trataría (tal y como se aborda el asunto de momento) de un campo propio de la cosmología, que ha sido descrito en un gran número de variantes. Pero no vamos a entrar aquí en ellas, ya que lo apuntado basta para que podamos atender a la cuestión de la interpretación más plausible de esta familia de modelos cosmológicos.

En mi opinión, y dado el estado actual de nuestros conocimientos, es poco lo que favorece una interpretación realista, y bastante más lo que inclina hacia una interpretación meramente instrumentalista de los modelos inflacionarios. Pues, si repasamos los criterios cuyo cumplimiento puede motivar la confianza en la adecuación a la realidad de un modelo cosmológico dado, vemos que, en el caso de la cosmología inflacionaria, no se cumple prácticamente ninguno. Si acaso, podríamos argumentar que la interpretación realista de este escenario cosmológico viene favorecida por la eliminación en él del ajuste fino de algunas de las condiciones iniciales del universo (la homogeneidad y planitud). Pues el

principio (ontológico!) de que el universo no debe poseer ningún rasgo que sugiera un diseño parece ocupar hoy día en muchas mentes un puesto similar al que ocupaba, en el pensamiento antiguo, el principio de que los movimientos celestes han de ser circulares. En realidad, el desarrollo de la cosmología inflacionaria parece, en no pocos aspectos, análogo al desarrollo de la cosmología alejandrina: Tenemos unos fenómenos que parecen apuntar en una dirección no deseada (los movimientos irregulares celestes, o el aparente ajuste fino de las condiciones iniciales del universo). De modo que tratamos de elaborar un modelo que nos muestre que las cosas son, en realidad, lo contrario de lo que parecen (es decir, que los movimientos celestes reales son circulares, o que las condiciones iniciales resultan prácticamente irrelevantes para la comprensión del desarrollo posterior del universo). Hasta aquí, estamos embarcados en una empresa realista, ya que intentamos desvelar cómo es el universo en realidad (o más bien, en este caso, de mostrar que el universo es como nosotros pensamos que tiene que ser). Pero luego surgen las dificultades: En primer lugar, ocurre que los modelos que explican bien los fenómenos no encaja bien con la física (los epíclicos y excéntricas no encajan con la física de Aristóteles, y el inflatón que necesitamos no podemos obtenerlo a partir de la física de partículas). En segundo lugar, ocurre que los modelos que elaboramos no son capaces de predecir nada nuevo, sino sólo de justificar lo que ya sabemos. En tercer lugar los modelos tienen que ir complicándose conforme se van conociendo nuevos datos (la mejora en la determinación de las posiciones del Sol y los planetas lleva consigo la introducción de un número creciente de epíclicos, excéntricas y ecuantes, del mismo modo que, por ejemplo, la determinación de la escala de las irregularidades en la radiación de fondo, y la determinación del posible valor positivo de la constante cosmológica da lugar a una complicación creciente en la forma del inflatón). En cuarto lugar ocurre que estas complicaciones de los modelos los van alejando cada vez más de la posibilidad de una contrastación empírica (cualquier dato puede encajarse añadiendo epíclicos o modificando arbitrariamente el campo inflatón). Y en quinto lugar ocurre que las mencionadas complicaciones de los modelos derivan en la posibilidad de explicar los datos experimentales desde construcciones teóricas diferentes, pero empíricamente equivalentes (explicaciones que incluyen epíclicos y deferentes concéntricos, o, alternativamente, deferentes excéntricos rotantes, o bien, en el caso inflacionario, explicaciones basadas en diversos tipos de inflaciones, como los introducidos por Linde y otros autores).

El resultado final, en el caso de la cosmología ptolemaica, es un modelo que induce a ser entendido como una mera herramienta de cálculo, despojado de toda pretensión de describir la realidad del universo. En el caso de la cosmología inflacionaria, el final de la historia no está escrito aún. Esto quiere decir que si, por ejemplo, alguno de los modelos de dicha cosmología permitiera predecir correctamente algún fenómeno todavía no observado, este hecho repercutiría en un aumento de nuestra confianza en el carácter realista del modelo en cuestión. O si, por poner otro caso hipotético, un inflatón bien ajustado a los datos relevantes (acerca de las irregularidades, la curvatura del universo y la constante cosmológica) pudiera derivarse de algún modelo verosímil de la física de partículas, este hecho también contribuiría a ver en la cosmología inflacionaria una descripción plausible del cosmos. Mientras que no se tenga ningún resultado de este tipo, lo más natural es considerar la hipótesis de la inflación como un modo de «salvar los fenómenos» conocidos sobre las condiciones iniciales del universo, pero, como diría Osiander, sin albergar la pretensión de que esta hipótesis sea cierta, o siquiera probable.

5.3 Cosmología cuántica

Y llegamos así al último tipo de modelos cosmológicos que quiero mencionar en este artículo: los modelos de la cosmología cuántica²⁶. La cosmología cuántica es un programa de investigación que trata de proporcionar un modelo del universo en el que, tanto la dinámica del cosmos, como el desarrollo de las estructuras del universo se describa en el marco de la teoría cuántica. Puesto que la dinámica a gran escala del universo viene determinada por la fuerza de gravedad, un modelo cuántico del universo ha de partir de una cuantización (siquiera aproximada) esta fuerza. Y otra condición que debe de cumplir cualquier modelo de este tipo es la de que la cosmología relativista pueda ser considerada como una aproximación (bajo ciertas circunstancias) de la descripción cuántica del universo. Esta condición se impone, obviamente, a la vista de la notable adecuación del modelo estándar a los datos observacionales.

Ahora bien, lo cierto es que hasta la fecha no ha sido formulada ninguna teoría completa de la gravedad cuántica. Y ni siquiera está claro que esta empresa vaya a tener éxito, dado que

²⁶ Dos buenas introducciones a la cosmología cuántica pueden encontrarse en Halliwell (1991) y Whiltshire (1996).

no se han observado fenómenos que apunten a una naturaleza cuántica de la gravedad. Es decir, la descripción clásica de la fuerza de gravedad, que se realiza en la teoría general de la relatividad, parece, de momento, plenamente adecuada para la caracterización de dicha fuerza. Sin embargo, los investigadores que trabajan en el programa de la gravedad cuántica albergan la esperanza de que en la escala de Planck (es decir, considerando intervalos temporales de 10^{-44} segundos, y espaciales de 10^{-35} metros) la gravedad nos muestre su oculto carácter cuántico... si es que alguien consigue alguna vez encontrar una huella de los sucesos que ocurren a semejante escala. En todo caso, hay una serie de investigadores que creen que el ámbito más propicio para buscar tales huellas es la cosmología. De modo que, en lugar de aguardar a poseer una teoría de la gravedad cuántica, para luego sacar las consecuencias cosmológicas oportunas, lo que se intenta es buscar un modelo exitoso de cosmología cuántica (basado en una cuantización tentativa de la gravedad), que ayude a formular la teoría precisa de la gravedad cuántica.

Existen numerosas cuantizaciones tentativas y parciales de la gravedad, y no podemos ocuparnos aquí de los modelos cosmológicos a los que dan lugar cada una de ellas. Pero, para que la discusión acerca del realismo de la cosmología cuántica no quede demasiado imprecisa, podemos fijarnos en una de las direcciones más influyentes de este programa de investigación. Se trata de la aproximación canónica.

La aproximación canónica lo que hace es proponer una cuantización de la formulación hamiltoniana de la relatividad general, con ayuda de técnicas de cuantización estándar, como, por ejemplo, la regla de Dirac. Como se sabe, el espacio de configuración de la formulación hamiltoniana de la relatividad general, está compuesto de pares $[h_{ij}, \phi(x)]$, en los que h_{ij} representa una métrica tridimensional, que determina las propiedades geométricas de un espacio tridimensional, y $\phi(x)$ representa un campo que describe la distribución de la materia en ese espacio. Cada uno de estos pares puede entenderse como una imagen instantánea de un espaciotiempo tetradimensional, si bien hay que tener en cuenta que los espaciotiempos tetradimensionales pueden caracterizarse por medio de diferentes sucesiones temporales de puntos en el espacio de configuración.

Sobre esta base, se trata de definir una función de onda $\Psi[h_{ij}, \phi(x)]$ aplicada a los pares de métricas tridimensionales y campos materiales que constituyen el espacio de configuración de la versión hamiltoniana de la relatividad general. Esta función de onda se denomina «función de onda del universo», y puede interpretarse del siguiente modo: supuesto que las

características de las métricas tridimensionales y los campos materiales que estemos considerando nos permitan definir un tiempo interno, la función de onda del universo nos indica la probabilidad de que encontremos en el universo una determinada geometría y una determinada configuración de materia en cada instante de ese tiempo interno.

Ahora bien, ¿cómo podemos determinar la función de onda del universo? Para ello necesitaríamos una ecuación análoga a la ecuación de Schrödinger de la mecánica cuántica. En la aproximación canónica, esta ecuación se construye cuantizando los momentos asociados con las variables del espacio de configuración, siguiendo la regla de Dirac que

consiste en la sustitución $\pi^{ij} \rightarrow -i \frac{\delta}{\delta h_{ij}}$ y $\pi^\phi \rightarrow -i \frac{\delta}{\delta \phi}$ y en la imposición de que estos

momentos «cuantizados» anulen la función de onda. Con estas condiciones se obtiene la llamada «ecuación de Wheeler-DeWitt». Cada solución de esta ecuación puede, en principio, entenderse como una posible descripción mecanocuántica de la dinámica del universo. La ocupación de buena parte de los cosmólogos cuánticos de los últimos decenios ha consistido, por tanto, en proponer soluciones a esta ecuación, y en defender que el universo real responde a la solución favorita de cada uno de ellos.

Pero, ¿de verdad lo hace? ¿Podemos considerar el planteamiento de la cosmología cuántica como una descripción realista del universo? Desde luego que no se puede pretender que un modelo en construcción cumpla bien con todos los criterios que hemos impuesto aquí a tales descripciones realistas. (Aunque los cosmólogos cuánticos ya llevan más de treinta años de construcción, sin ningún avance considerable!). En todo caso, pocos criterios de realismo se cumplen, por ahora, en este programa: La cosmología cuántica no se apoya en ninguna teoría física aceptada (sino que trata de construir su propia física); existen numerosos modelos diferentes, pero empíricamente equivalentes; no se han realizado nuevas predicciones contrastables de ningún tipo etc. etc. Si acaso, cabe decir, en soporte de un enfoque realista de estos modelos, que buscan una cosmología adecuada a ciertos planteamientos, de carácter ontológico, muy extendidos entre los físicos teóricos actuales (por ejemplo, la consideración de que, por simplicidad, debe existir un marco unitario para la descripción de todas las interacciones físicas, y que ese marco es de naturaleza cuántica; o también la consideración de que las singularidades y los infinitos no se dan en la naturaleza, sino que sólo indican un límite de nuestras teorías; o también la consideración de que las condiciones iniciales del universo han de ser irrelevantes, o, alternativamente,

autoexplicadas mediante un modelo cosmológico adecuado). En qué medida consiguen los modelos de la cosmología cuántica adaptarse a tales requisitos, es discutible. En todo caso, hay que decir que este programa de investigación, además de las deficiencias ya indicadas, también tiene que hacer frente a dificultades notables para adaptarse a ciertos aspectos de la realidad, como es el de la temporalidad.

Ya nos hemos referido a la cuestión de la experiencia de la temporalidad, con relación al modelo estándar del universo. En el caso del modelo estándar, la referencia era positiva, puesto que dicho modelo parece que podría contribuir a entender el modo de compaginar esta experiencia con el marco físico relativista. En el caso de la cosmología cuántica, o, al menos, en el caso de muchos modelos de este programa, la situación es la inversa: Resulta prácticamente imposible entender esta experiencia en el marco de dichos modelos. La razón de ello es que en los modelos más importantes de la cosmología cuántica la variable temporal no aparece para nada en la descripción fundamental, o bien, si aparece (por ejemplo en la forma de un tiempo interno), se trata de una variable formalmente indistinguible de las variables espaciales. Ahora bien, esta espacialización del tiempo nos lleva de cabeza al universo bloque al que nos referíamos anteriormente. Y, en un contexto así, la experiencia del momento presente, del devenir, del orden del devenir, etc. etc. se vuelven profundamente problemáticas. Ninguna de las mencionadas experiencias tiene su base en la descripción fundamental de la naturaleza, vista desde la perspectiva de la cosmología cuántica. Entonces, ¿cómo es que las experimentamos? ¿Cuál es el origen de esta «ilusión» temporal tan penetrante? No conozco, por parte de los cosmólogos cuánticos, ninguna respuesta adecuada a estas pregunta.

De modo que, en resumen, la cosmología cuántica nos ofrece (de momento) una serie de modelos en construcción, sin predicciones contrastables, infinitamente adaptables a los resultados empíricos que se quieran explicar, sin apoyo en una teoría física sólidamente establecida, y con enormes dificultades para compaginar su imagen del cosmos con aspectos de nuestra experiencia tan importantes como el de la temporalidad. Sobra decir que, en estas condiciones, no parece razonable considerar tales modelos como una descripción realista del mundo.

6. Conclusión

Partiendo de una serie de criterios, obtenidos de la consideración de ejemplos históricos, hemos comparado la plausibilidad de la interpretación realista (y de la interpretación instrumentalista) de los modelos más interesantes de la cosmología física actual. Mientras que, dado el estado de nuestros conocimientos, una interpretación realista del modelo clásico de la Gran Explosión parece más verosímil que su oponente instrumentalista, lo contrario puede decirse de la variante inflacionaria de este modelo. En cuanto a la cosmología cuántica, es difícil, en el estadio actual, interpretarla de ninguna manera. Puesto que, ni cumple con los requisitos que favorecerían una interpretación realista de la misma, ni presenta ninguna ventaja (de cálculo, o explicativa) que permita, al menos, su aceptación como herramienta instrumentalista. De manera que, tal y como están las cosas por ahora, parece juicioso el considerar, al menos, las líneas generales del escenario cosmológico del *big bang* como una cierta aproximación de la dinámica (y de la forma de ser) real del universo. Mucho menos juicioso resulta el dar crédito a los detalles particulares de cualquiera de las numerosas variantes inflacionarias y cuánticas de este escenario.

Referencias

- Börner, G. (1996): «Classical Cosmology». En: B. Robson y otros. (eds.): *Cosmology: The Physics of the Universe*. (Singapur: World Scientific) pp.48-110.
- Brandenberger, R. (1999): «Inflationary cosmology: progress and problems». En: <http://xxx.lanl.gov/hep-ph/9910410>.
- Carrier, M. (2001): *Nikolaus Kopernikus*. (Munich: Beck).
- Craig, W. L. (2001a): *Time and the Metaphysics of Relativity*. (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers).
- Craig, W. L. (2001b): *God, Time, and Eternity*. (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers).

Craig, W. L. (2000a): *The Tensed Theory of Time. A Critical Examination*. (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers).

Craig, W. L. (2000b): *The Tenseless Theory of Time. A Critical Examination*. (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers).

Halliwell, J. (1991): «Introductory Lectures on Quantum Cosmology». En: S. Coleman y otros (eds.): *Quantum Cosmology and Baby Universes*. (Singapur: World Scientific) pp.159-244.

Jacobsen, T. (1999): *Planetary systems from the ancient Greeks to Kepler*. (Seattle: University of Washington Press).

Kragh, H. (1996): *Cosmology and Controversy*. (Princeton, New Jersey: Princeton University Press).

Mosterín, J. y Torretti, R. (2002): *Diccionario de lógica y filosofía de la ciencia*. (Madrid: Alianza Editorial).

Rioja, A. y Ordoñez, J. (1999): *Teorías del universo. I*. (Madrid: Síntesis).

Schneider, P. (2006): *Einführung in die extragalaktische Astronomie und Kosmologie*. (Berlin: Springer).

Soler Gil, F. J. (2003): *Aristóteles en el mundo cuántico*. (Granada: Comares).

Wiltshire, D. (1996): «An Introduction to Quantum Cosmology». En: B. Robson y otros (eds.): *Cosmology: The Physics of the Universe*. (Singapur: World Scientific) pp.473-531.