

Steven Weinberg

Los tres primeros minutos del universo



Alianza editorial
El libro de bolsillo

Título original: *The First Three Minutes – A Modern View
of the Origins of the Universe*
Traducción de Néstor Míguez

Esta obra ha sido publicada en inglés
por Basic Books. Inc., New York

Primera edición: 1978
Segunda edición: 2016
Tercera reimpresión: 2023

Diseño de colección: Estrada Design
Diseño de cubierta: Manuel Estrada
Ilustración de cubierta: Foto de la nebulosa NGC 604
© Getty Images/NASA
Selección de imagen: Carlos Caranci Sáez

Reservados todos los derechos. El contenido de esta obra está protegido por la Ley, que establece penas de prisión y/o multas, además de las correspondientes indemnizaciones por daños y perjuicios, para quienes reprodujeren, plagiaren, distribuyeren o comunicaren públicamente, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, o su transformación, interpretación o ejecución artística fijada en cualquier tipo de soporte o comunicada a través de cualquier medio, sin la preceptiva autorización.

© 1977 by Steven Weinberg
© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 1978, 2023
Calle Valentín Beato, 21
28037 Madrid
www.alianzaeditorial.es



ISBN: 978-84-9104-350-8
Depósito legal: M. 3.029-2016
Printed in Spain

Si quiere recibir información periódica sobre las novedades de Alianza Editorial,
envíe un correo electrónico a la dirección: alianzaeditorial@anaya.es

Índice

11	Prefacio
17	1. Introducción: el gigante y la vaca
26	2. La expansión del universo
66	3. El fondo de radiación cósmica de microondas
116	4. Receta para un universo caliente
145	5. Los tres primeros minutos
170	6. Una digresión histórica
183	7. La primera centésima de segundo
204	8. Epílogo: la perspectiva futura
	Suplemento matemático
215	1. El efecto Doppler
217	2. La densidad crítica
220	3. Escalas de tiempo de expansión
226	4. Radiación del cuerpo negro
230	5. La masa de Jeans
233	6. La temperatura y densidad de los neutrinos
237	Sugerencias para lectura adicionales
243	Glosario
257	Índice analítico

A mis padres

Prefacio

Este libro surgió de una charla que di en el Centro de Estudiantes de Ciencias de Harvard en noviembre de 1973. Erwin Glikes, presidente y editor de Basic Books, oyó hablar de esta charla a un amigo común, Daniel Bell, y me instó a que la convirtiera en un libro.

Al principio la idea no me entusiasmó. Aunque he realizado algunos pequeños trabajos de investigación en cosmología de tanto en tanto, mi labor ha estado dedicada en mucha mayor medida a la física de lo muy pequeño, la teoría de las partículas elementales. Por otra parte, la física de partículas elementales ha sido un campo extraordinariamente activo en los últimos años, y yo había estado demasiado tiempo apartado de él, escribiendo artículos no técnicos para diversas revistas. Tenía muchos deseos de volver de lleno a mi hábitat natural, la *Physical Review*.

Sin embargo, no pude dejar de pensar en la idea de un libro sobre el universo primitivo. ¿Qué puede ser más interesante que el problema del Génesis? Asimismo, en el universo primitivo, especialmente en la primera centésima de segundo, los problemas de la teoría de las partículas elementales se unen a los problemas de la cosmología. Sobre todo, este es un buen momento para escribir sobre el universo primitivo. Justamente en la última década se ha difundido la aceptación, como «modelo estándar», de una teoría detallada sobre el curso de los sucesos en el universo primitivo.

Es una cosa notable poder decir cómo era el universo al final del primer segundo, el primer minuto o el primer año. Para un físico lo estimulante es poder efectuar cálculos numéricos, poder decir que después de tal y cual tiempo determinado la temperatura, la densidad y la composición química del universo tenían tales y cuales valores. Es verdad que no estamos absolutamente seguros de todo esto, pero es emocionante el que podamos ahora hablar de estas cosas con alguna confianza. Fue esta emoción lo que quise transmitir al lector.

Es mejor que aclare a qué tipo de lector está destinado este libro. He escrito para un lector que está dispuesto a abordar argumentaciones detalladas, pero no está familiarizado con la matemática ni con la física. Aunque debo exponer algunas ideas científicas bastante complicadas, en el libro no se usa matemática alguna que vaya más allá de la aritmética ni se presupone conocimiento alguno de la física o la astronomía. He tratado de definir cuidadosamente los términos cuando se los usa por vez primera, y

además he proporcionado un glosario de términos físicos y astronómicos (p. 243). Cuando me ha sido posible, también he escrito números como «cien mil millones» en lenguaje común, en lugar de usar la notación científica más conveniente: 10^{11} .

Sin embargo, esto no significa que haya tratado de escribir un libro fácil. Cuando un abogado escribe para el público general supone que la gente no conoce el derecho francés o la ley contra las rentas perpetuas, pero no por eso piensa mal de ella ni la trata con menosprecio. Quiero devolver la atención: me figuro al lector como un astuto viejo abogado que no habla *mi* lenguaje, mas espera, ello no obstante, oír algunos argumentos convincentes antes de formarse un juicio.

Para el lector que desea conocer algunos de los cálculos que fundamentan los argumentos de este libro he preparado un «Suplemento matemático» que va al final del libro (p. 213). La matemática usada aquí hace estas notas accesibles a cualquier estudiante no graduado de una ciencia física o matemática. Afortunadamente, en cosmología los cálculos más importantes son bastante sencillos; sólo de tanto en tanto es menester recurrir a los recursos más refinados de la relatividad general o la física nuclear. Los lectores que deseen proseguir el estudio de este tema en un plano más técnico hallarán varios tratados avanzados (incluso uno mío) que se indican en las «Sugerencias para lecturas adicionales» (p. 237).

Debo también aclarar cuál es el alcance que pretendo dar a este libro. Categóricamente, no es un libro sobre todos los aspectos de la cosmología. El tema tiene una

parte «clásica», que se relaciona principalmente con la estructura a gran escala del universo actual: el debate sobre el carácter extragaláctico de las nebulosas espirales; el descubrimiento de los corrimientos hacia el rojo de las galaxias distantes y su dependencia de la distancia; los modelos cosmológicos basados en la relatividad general, de Einstein, de Sitter, Lemaître y Friedmann, etc. Esta parte de la cosmología ha sido muy bien descrita en una cantidad de valiosos libros, y no tengo intención de hacer aquí una exposición detallada de ella. Este libro trata del universo primitivo, y en particular del nuevo conocimiento del universo primitivo que ha originado el descubrimiento del fondo de radiación cósmica de microondas realizado en 1965.

Desde luego, la teoría de la expansión del universo es un componente esencial de nuestra actual concepción del universo primitivo, por lo que me he visto obligado, en el Capítulo 2, a hacer una breve introducción a los aspectos más «clásicos» de la cosmología. Creo que este capítulo brindará una base adecuada, aun al lector que desconoce completamente la cosmología, para comprender los desarrollos recientes en la teoría del universo primitivo de la que trata el resto del libro. Sin embargo, al lector que desee adquirir un conocimiento cabal de las partes más viejas le instamos a consultar los libros indicados en las «Sugerencias para lecturas adicionales».

En cambio, no he podido hallar ninguna exposición histórica coherente de los recientes desarrollos de la cosmología. Por ello me he visto obligado a hacer alguna investigación por mi cuenta en este campo, en par-

ticular con respecto a la fascinante cuestión de por qué no se llevaron a cabo investigaciones sobre el fondo de radiación cósmica de microondas mucho antes de 1965. (Examinamos esta cuestión en el Capítulo 6). Lo cual no significa que yo considere este libro como una historia definitiva de estos desarrollos; tengo demasiado respeto por el esfuerzo y la atención al detalle que se necesita en la historia de la ciencia para hacerme alguna ilusión a este respecto. Por el contrario, me sentiría feliz si un historiador auténtico de la ciencia usara este libro como punto de partida y escribiera una historia adecuada de los últimos treinta años de investigación cosmológica.

Estoy sumamente agradecido a Erwin Glikes y Farrell Phillips de Basic Books por sus valiosas sugerencias en la preparación de este manuscrito para su publicación. También he sido ayudado en mayor medida de lo que puedo expresar en la redacción de este libro por el amable consejo de mis colegas de la física y la astronomía. Por tomarse el trabajo de leer y comentar partes de este libro, quiero agradecer especialmente a Ralph Alpher, Bernard Burke, Robert Dicke, George Field, Gary Feinberg, William Fowler, Robert Herman, Fred Hoyle, Jim Peebles, Arno Penzias, Bill Press, Ed. Purcell y Robert Wagoner. Vaya también mi agradecimiento a Isaac Asimov, I. Bernard Cohen, Martha Liller y Phillip Morrison por suministrarme información sobre diversos temas espaciales. Estoy particularmente agradecido a Nigel Calder por haber leído en su totalidad el primer esbozo y por sus agudos comentarios. No puedo abrigar la esperanza de que este libro se halle totalmente libre de errores y oscuridades,

pero estoy seguro de que es mucho más claro y preciso de lo que hubiese sido sin toda la generosa ayuda que tuve la fortuna de recibir.

Steven Weinberg
Cambridge, Massachusetts
Julio de 1976

1. Introducción: el gigante y la vaca

En la *Edda Menor*, una colección de mitos nórdicos compilada aproximadamente en 1220 por el magnate islandés Snorri Sturluson, se explica el origen del universo. En el origen, dice la *Edda Menor*, no había nada en absoluto. «No había Tierra, ni Cielo por encima de ella; había un gran Abismo, y en ninguna parte había hierba.» Al norte y al sur de esa nada había regiones de hielo y fuego, Niflheim y Muspelheim. El calor de Muspelheim fundió parte del hielo de Niflheim, y de las gotas del líquido surgió un gigante, Ymer. ¿Qué comía Ymer? Al parecer, había también una vaca, Audhumla. ¿Y qué comía ésta? Pues bien, había asimismo un poco de sal. Y así sucesivamente.

No quiero ofender la sensibilidad religiosa, ni siquiera la de los vikingos, pero considero justo decir que éste no es un cuadro muy satisfactorio del origen del universo. Aun dejando de lado todas las objeciones que pueden hacerse a

lo que se sabe de oídas, el relato plantea tantos problemas como los que responde, y cada respuesta exige dar mayor complicación a las condiciones iniciales.

No podemos sencillamente sonreír ante la *Edda Menor* y renunciar a toda especulación cosmogónica: el deseo de conocer la historia del universo es irresistible. Desde los comienzos de la ciencia moderna, en los siglos XVI y XVII, los físicos y los astrónomos han vuelto una y otra vez al problema del origen del universo.

Sin embargo, una aureola de mala reputación rodeó siempre a tales investigaciones. Recuerdo que en la época en que yo era estudiante y luego, cuando comencé mis propias investigaciones (sobre otros problemas), en el decenio de 1950, el estudio del universo primitivo era considerado en general como algo a lo que no debía dedicar su tiempo un científico respetable. Y este juicio no carecía de justificación. Durante la mayor parte de la historia de la física y la astronomía modernas sencillamente no hubo fundamentos adecuados, de observación y teóricos, sobre los cuales construir una historia del universo primitivo.

Ahora, en la década que acaba de transcurrir, todo esto ha cambiado. Se ha difundido la aceptación de una teoría sobre el universo primitivo que los astrónomos suelen llamar «el modelo estándar». Es muy similar a lo que se llama a veces la teoría de «la Gran Explosión», pero complementada con indicaciones mucho más específicas sobre el contenido del universo. Esta teoría del universo primitivo es el objeto de este libro.

Para ver a dónde apuntamos, puede ser útil partir de un resumen de la historia del universo primitivo según la describe actualmente el modelo estándar. Este es sólo un

breve esbozo; en los capítulos siguientes explicaremos los detalles de esta historia y las razones que tenemos para creer en ella.

En el comienzo hubo una explosión. No una explosión como las que conocemos en la Tierra, que parten de un centro definido y se expanden hasta abarcar una parte más o menos grande del aire circundante, sino una explosión que se produjo simultáneamente en todas partes, llenando todo el espacio desde el comienzo y en la que toda partícula de materia se alejó rápidamente de toda otra partícula. «Todo el espacio», en este contexto, puede significar, o bien la totalidad de un universo infinito, o bien la totalidad de un universo finito que se curva sobre sí mismo como la superficie de una esfera. Ninguna de estas posibilidades es fácil de comprender, pero esto no será un obstáculo para nosotros; en el universo primitivo, importa poco que el espacio sea finito o infinito.

Al cabo de una centésima de segundo aproximadamente, que es el momento más primitivo del que podemos hablar con cierta seguridad, la temperatura del universo fue de unos cien mil millones (10^{11}) de grados centígrados. Se trata de un calor mucho mayor aún que el de la estrella más caliente, tan grande en verdad que no pueden mantenerse unidos los componentes de la materia ordinaria: moléculas, átomos o siquiera núcleos de átomos. En cambio, la materia separada en esta explosión consistía en diversos tipos de las llamadas partículas elementales, que son el objeto de estudio de la moderna física nuclear de altas energías.

Encontraremos repetidamente estas partículas en este libro; por el momento bastará nombrar a las que eran

más abundantes en el universo primitivo, y dejaremos las explicaciones más detalladas para los Capítulos 3 y 4. Un tipo de partícula que estaba presente en gran cantidad era el electrón, la partícula con carga negativa que fluye por los cables en la corriente eléctrica y constituye las partes exteriores de todos los átomos y moléculas del universo actual. Otro tipo de partícula que abundaba en tiempos primitivos era el positrón, una partícula de carga positiva que tiene exactamente la misma masa que el electrón. En el universo actual sólo se encuentran positrones en los laboratorios de altas energías, en algunas especies de radiactividad y en los fenómenos astronómicos violentos, como los rayos cósmicos y las supernovas, pero en el universo primitivo, el número de positrones era casi exactamente igual al número de electrones. Además de los electrones y los positrones, había cantidades similares de diversas clases de neutrinos, fantasmales partículas que carecen de masa y carga eléctrica. Finalmente, el universo estaba lleno de luz. No debemos considerar la luz separadamente de las partículas, pues la teoría cuántica nos dice que la luz consiste en partículas de masa cero y carga eléctrica cero llamadas fotones. (Cada vez que un átomo del filamento de una bombilla eléctrica pasa de un estado de alta energía a otro de baja energía se emite un fotón. Hay tantos fotones que salen de una bombilla eléctrica que parecen fundirse en una corriente continua de luz, pero una célula fotoeléctrica puede contar fotones individuales, uno por uno). Todo fotón lleva una cantidad de energía y un momento definidos que dependen de la longitud de onda de la luz. Para describir la luz que llenó el universo primitivo po-

demos decir que el número y la energía media de los fotones eran aproximadamente los mismos que los de electrones, positrones o neutrinos.

Estas partículas –electrones, positrones, neutrinos y fotones– eran creadas continuamente a partir de la energía pura, y después de una corta vida eran aniquiladas de nuevo. Su número, por tanto, no estaba prefijado, sino que lo determinaba el balance entre los procesos de creación y de aniquilamiento. De este balance podemos inferir que la densidad de esta sopa cósmica a una temperatura de cien mil millones de grados era unos cuatro mil millones (4×10^9) de veces mayor que la del agua. Hubo también una pequeña contaminación de partículas más pesadas, protones y neutrones, que en el mundo actual son los constituyentes de los núcleos atómicos. (Los protones tienen carga positiva; los neutrones son un poco más pesados y eléctricamente neutros). Las proporciones eran, más o menos, de un protón y un neutrón por cada mil millones de electrones, positrones, neutrinos o fotones. Este número –mil millones de fotones por partícula nuclear– es la cantidad crucial que tuvo que ser derivada de la observación para elaborar el modelo estándar del universo. En efecto, el descubrimiento del fondo de radiación cósmica, que examinaremos en el Capítulo 3, fue una medición de esa magnitud.

A medida que la explosión continuó, la temperatura fue disminuyendo hasta llegar a los treinta mil millones (3×10^{10}) grados centígrados después de un décimo de segundo, diez mil millones de grados después de un segundo y tres mil millones de grados después de unos catorce segundos. Esta temperatura era suficientemente

baja como para que los electrones y positrones comenzaran a aniquilarse más rápidamente de lo que podían ser recreados a partir de los fotones y los neutrinos. La energía liberada en este aniquilamiento de materia hizo disminuir temporalmente la velocidad a la que se enfriaba el universo, pero la temperatura continuó cayendo, para llegar a los mil millones de grados al final de los tres primeros minutos. Esta temperatura fue entonces suficiente para que los protones y neutrones comenzaran a formar núcleos complejos, comenzando con el núcleo del hidrógeno pesado (o deuterio), que consiste en un protón y un neutrón. La densidad era aún bastante elevada (un poco menor que la del agua), de modo que estos núcleos ligeros pudieron unirse rápidamente en el núcleo ligero más estable, el del helio, que consiste en dos protones y dos neutrones.

Al final de los tres primeros minutos, el universo contenía principalmente luz, neutrinos y antineutrinos. Había también una pequeña cantidad de material nuclear, formado ahora por un 73% de hidrógeno y un 27% de helio, aproximadamente, y por un número igualmente pequeño de electrones que habían quedado de la época del aniquilamiento entre electrones y positrones. Esta materia siguió separándose y se volvió cada vez más fría y menos densa. Mucho más tarde, después de algunos cientos de miles de años, se hizo suficientemente fría como para que los electrones se unieran a los núcleos para formar átomos de hidrógeno y de helio. El gas resultante, bajo la influencia de la gravitación, comenzaría a formar agrupamientos que finalmente se condensarían para formar las galaxias y las estrellas del universo ac-

tual. Pero los ingredientes con los que empezarán su vida las estrellas serían exactamente los preparados en los tres primeros minutos.

El modelo estándar que acabamos de esbozar no es la teoría más satisfactoria imaginable del origen del universo. Como en la *Edda menor*, hay una embarazosa vaguedad con respecto al comienzo mismo, a la primera centésima de segundo aproximadamente. De igual modo, se presenta la incómoda necesidad de establecer condiciones iniciales, en especial la proporción inicial de mil millones a uno entre los fotones y las partículas nucleares. Preferiríamos una mayor inevitabilidad lógica en la teoría.

Por ejemplo, una teoría alternativa que parece filosóficamente mucho más atractiva es el llamado modelo del estado estacionario. En esta teoría, propuesta a fines del decenio de 1940 por Hermann Bondi, Thomas Gold y (en una formulación un poco diferente) Fred Hoyle, el universo ha sido siempre más o menos igual a como es ahora. A medida que se expande, continuamente se crea nueva materia que llena los vacíos entre las galaxias. Potencialmente, todas las cuestiones sobre por qué el universo es como es pueden responderse en esta teoría mostrando que es así porque es el único modo de que pueda seguir siendo igual. Se elimina entonces el problema del universo primitivo, ya que no hubo ningún universo primitivo.

¿Cómo, pues, hemos llegado al modelo estándar? ¿Y cómo ha reemplazado a otras teorías, por ejemplo, al modelo del estado estacionario? Es un tributo a la esencial objetividad de la astrofísica moderna el hecho de que este consenso se ha logrado, no mediante cambios

en las preferencias filosóficas o por la influencia de los mandarines astrofísicos, sino bajo la presión de los datos empíricos.

En los dos capítulos siguientes describiremos las dos grandes claves, suministradas por la observación astronómica, que nos han llevado al modelo estándar: el descubrimiento del alejamiento de las galaxias distantes y el de una débil radiación de fondo que llena el universo. Se trata de una rica historia para el historiador de la ciencia, llena de falsos comienzos, oportunidades perdidas, preconceptos teóricos y la acción de las personalidades.

Después de este examen panorámico de la cosmología observacional, trataré de armar las piezas que proporcionan los datos del modo de formar un cuadro coherente de las condiciones físicas en el universo primitivo. Esto nos permitirá volver a los tres primeros minutos con mayor detalle. Aquí parece apropiado un tratamiento cinematográfico: imagen tras imagen, veremos al universo expandirse, enfriarse y asarse. Intentaremos también penetrar un poco en una época que aún permanece en el misterio: la primera centésima de segundo y lo que ocurrió antes.

¿Podemos realmente abrigar certidumbre en lo que respecta al modelo estándar? ¿Darán en tierra con él los nuevos descubrimientos y lo reemplazarán por alguna otra cosmogonía o aun revivirán el modelo del estado estacionario? Quizá. No puedo negar que experimento una sensación de irrealidad cuando escribo sobre los tres primeros minutos como si realmente supiésemos de qué estamos hablando.

Sin embargo, aunque se llegue a reemplazarlo, el modelo estándar habrá desempeñado un papel de gran valor

en la historia de la cosmología. Hoy día (aunque desde hace sólo un decenio, aproximadamente) es costumbre respetable poner a prueba ideas teóricas de la física o la astrofísica extrayendo sus consecuencias en el contexto del modelo estándar. Es también práctica común usar el modelo estándar como base teórica para justificar programas de observación astronómica. Así, el modelo estándar brinda un lenguaje común esencial que permite a teóricos y observadores evaluar mutuamente sus realizaciones. Si algún día el modelo estándar es reemplazado por una teoría mejor, probablemente será en virtud de observaciones o cálculos originados en el propio modelo estándar.

En el capítulo final me referiré al futuro del universo. Puede continuar expandiéndose eternamente, enfriándose, vaciándose y agonizando. Alternativamente, puede contraerse nuevamente disolviendo otra vez las galaxias, las estrellas, los átomos y los núcleos atómicos en sus constituyentes. Todos los problemas que se nos presentan en la comprensión de los tres primeros minutos surgirán, pues, nuevamente en la predicción del curso de los sucesos en los últimos tres minutos.