

Tony Rothman

El pequeño libro del Big Bang

Traducción de Miguel Paredes Larrucea



Alianza editorial
El libro de bolsillo

Título original: *A Little Book about the Big Bang*

Esta edición se ha publicado mediante acuerdo con Harvard University Press a través de International Editors & Yañez' Co.

Diseño de colección: Estrada Design

Diseño de cubierta: Manuel Estrada

Ilustración de cubierta: © Maarten Wouters / Getty Images

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.



© 2022 by the President and Fellows of Harvard College

© de la traducción: Miguel Paredes Larrucea, 2024

© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 2024

Calle Valentín Beato, 21

28037 Madrid

www.alianzaeditorial.es

ISBN: 978-84-1148-674-3

Depósito legal: M. 4.671-2024

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 | Introducción |
| 19 | 1. Gravedad, calabazas y cosmología |
| 26 | 2. Una teoría especial |
| 34 | 3. La relatividad general, fundamento de la cosmología |
| 49 | 4. El universo en expansión |
| 61 | 5. La piedra de Roseta de la cosmología: la radiación cósmica de fondo |
| 72 | 6. El caldero primigenio |
| 86 | 7. Un universo oscuro |
| 96 | 8. Un universo más oscuro |
| 105 | 9. Las galaxias existen, y nosotros también |
| 113 | 10. El órgano universal |
| 126 | 11. El primer abrir y cerrar de ojos: la inflación cósmica |
| 138 | 12. Inflar o no inflar |
| 147 | 13. Implosiones y rebotes |
| 154 | 14. ¿Por qué una gravedad cuántica? |
| 169 | 15. Multiversos y metafísica |
| 179 | Lecturas suplementarias |
| 183 | Agradecimientos |
| 185 | Índice analítico |

*A mis profesores y colegas,
que me enseñaron más de lo que saben.*

Introducción

¿Por qué hay algo en lugar de nada?

Este es un pequeño libro sobre el asunto más grande que se pueda imaginar: el Big Bang. No es un libro sobre un *show* de televisión. Es un libro sobre cosmología. La cosmología, tal como la conciben los cosmólogos, es el estudio de la estructura y la evolución del universo en su conjunto. A lo largo del siglo pasado vino a significar cada vez más el estudio de los primeros momentos del universo: la investigación del origen de las galaxias, el análisis de los elementos químicos más ligeros, la observación de la radiación térmica que permea todo el espacio, y la exploración de fenómenos exóticos que no podemos ver directamente: la materia oscura y la energía oscura. Generalmente los cosmólogos están interesados en el universo en los primeros eones, años e incluso fracciones de segundo después de su nacimiento. La cosmología es precisamente la teoría del origen del universo: el Big Bang, la Gran Explosión.

La cosmología se denomina a veces el punto de encuentro de la física y la filosofía. Eso es en cierta medida verdad y en cierta medida inevitable. En el fondo, toda la ciencia consiste en formular preguntas y buscar respuestas. Si las preguntas se llevan suficientemente lejos, se nos agotan inevitablemente las respuestas. La cosmología está especialmente expuesta a esta dificultad. Cuando surge una conversación sobre el Big Bang, lo primero que preguntan los no cosmólogos (que son la mayoría de la gente) es: «¿Qué pasó antes del Big Bang?». La pregunta es natural y legítima, pero de momento no tiene respuesta, y lo más probable es que este estado de cosas persista más allá de la fecha de caducidad de este autor.

Con todo, mi plan es plantear las preguntas que formulan los legos en la materia y otras personas e intentar contestarlas de la manera más sencilla posible. Como el libro está pensado sobre todo para personas que sienten curiosidad por la ciencia pero que carecen de formación científica y matemática, a mis colegas le parecerá incompleto y falto de rigor; pero mi intención no es cubrir el mayor territorio posible, sino descubrir, si puedo, un pequeño territorio.

Para ello he intentado limitar al máximo la jerga técnica, y aunque habrá números para satisfacer a todo el mundo, ninguna de las ecuaciones incluidas en el texto es más complicada que la de la línea recta; lo demás lo he relegado a unas cuantas notas a pie de página. He supuesto también que el lector es capaz de entender gráficos sencillos y está dispuesto a seguir algunos argumentos bastante detallados. Por otro lado, estoy de acuerdo con uno de los incontables aforismos que Einstein jamás utilizó: hacer las cosas «tan simples como sea posible, pero no más». Con los años he

llegado al convencimiento de que existe realmente un nivel por debajo del cual algunas cosas no se pueden simplificar; en la cosmología esto se debe en gran parte a su naturaleza intrínsecamente matemática. Si no soy capaz de explicar las matemáticas en términos de un concepto físico que sea comprensible, no lo intentaré.

A pesar de que en el libro no hay nada parecido a verdaderas matemáticas, uno de sus objetivos es convencer al lector de que la cosmología moderna es un extraordinario edificio construido sobre sólidos fundamentos y de que debería creer en ella. Para ello cada capítulo se basa generalmente en el anterior. Conviene empezar el libro por el principio. Si el único interés del lector es la conclusión final, caerá en la impaciencia.

Como queda dicho, la cosmología plantea preguntas profundas. Al explorar los fundamentos conceptuales de la moderna teoría del Big Bang, mi esperanza es no rehuir tales preguntas. Como aconsejó en una ocasión cierto mentor: «Si haces una pregunta estúpida, puede que te sientas tonto. Si no haces una pregunta estúpida, seguirás siendo tonto».

A medida que avanza el libro habrá inevitablemente más preguntas que respuestas. Después de todo, al ponderar lo imponderable, hay solo un paso del «¿qué pasó antes del Big Bang?», al enigma final: «¿Por qué hay algo en lugar de nada?». Teniendo en cuenta que, de una manera u otra, la humanidad viene preguntándose eso desde hace miles de años sin llegar a ningún consenso, no es razonable esperar encontrar la respuesta aquí. De hecho, si se le hace esa pregunta a un cosmólogo sincero, la única respuesta que se obtendrá será un «no sé». Una pregunta más fácil es: «Esas

ecuaciones en el tablero blanco del *show* de televisión, ¿significan algo?». La respuesta es que sí. Mi experiencia personal es que los cosmólogos están mal equipados para contestar preguntas sobre cosmética.

*

Teniendo en cuenta que el libro está pensado para el público general, en lugar de ecuaciones utilizo analogías. El peligro que acecha detrás de esta decisión es que tarde o temprano todas las analogías dejan de ser válidas. Las analogías, como las teorías, son modelos de la realidad, no la realidad misma. En el caso del Big Bang, los cosmólogos suelen recurrir a la idea de un globo para explicar ciertas propiedades del universo en expansión; pero el universo real no es un globo y la analogía es imperfecta. Al utilizar analogías es crucial identificar las diferencias entre la analogía y la realidad.

He utilizado ya varias veces la palabra *teoría*. Quiero subrayar que este término, en boca de los científicos, tiene un significado diferente del que tiene en la vida diaria. Por ejemplo, en la radio se oye a veces que el fiscal tiene una determinada teoría sobre un delito, mientras que el abogado defensor tiene la teoría de que el fiscal está loco. En general se trata de conjeturas hechas por entero sin pruebas, y la situación cambia con demasiada frecuencia para que tengan sentido.

Una teoría física, por el contrario, es una malla altamente interconectada de ideas y predicciones basadas en las matemáticas y apoyadas firmemente por evidencia experimental y observacional. Cuando los cosmólogos hablan de la teoría del Big Bang se están refiriendo justamente a una de

esas mallas de predicciones y observaciones. Los elementos de la teoría del Big Bang llevan ya todo un siglo bajo escrutinio, y el cuadro general está apoyado por tantas observaciones precisas, que hay cosmólogos que piensan que su disciplina se parece ya más a ingeniería que a investigación fundamental. El lector debe creer en la cosmología moderna.

*

Pero hay una diferencia fundamental entre la cosmología y la mayoría de las demás ciencias: universo observable no hay más que uno. La esencia de la mayor parte de las ciencias es la experimentación y la replicación. El fabricante de medicamentos ensaya una vacuna haciendo pruebas clínicas con muchos sujetos. Si los resultados no pueden ser replicados por otros científicos en el mundo entero, la vacuna no se considera fiable. Los cosmólogos, al menos por ahora, no disponen de la posibilidad de hacer experimentos con múltiples universos y por tanto no pueden decir con absoluta certeza cómo sería el universo si las cosas hubiesen comenzado de manera distinta a como realmente comenzaron.

Sin embargo, aunque los cosmólogos no pueden decir todo, pueden decir mucho más que nada. El hecho de disponer de un solo universo solo supone una dificultad al considerar el universo en su conjunto y abordar las preguntas finales. Al margen de eso, los cosmólogos utilizan los datos y observaciones recogidos por sus primos hermanos, los astrónomos. Los astrónomos han investigado tradicionalmente el comportamiento de los planetas, estrellas y galaxias mediante telescopios terrestres o telescopios en órbi-

tas próximas a la Tierra. Sí, los astrónomos son marineros de agua dulce, o podrían serlo; ninguna nave espacial y ningún telescopio ha viajado, ni con mucho, hasta la estrella más próxima, y mucho menos hasta otra galaxia, lo cual significa que es imposible realizar experimentos con objetos astronómicos. Con razón se dice que la astronomía es una ciencia observacional.

Ahora bien, el supuesto fundamental que subyace en toda la astronomía es que las leyes fundamentales de la física son las mismas en todo el universo. Los astrofísicos, también primeros cercanos de los cosmólogos y astrónomos, han aplicado estas leyes para decodificar el comportamiento de las estrellas y galaxias. Como es poco práctico enviar una sonda espacial a los confines remotos del universo, al menos dentro del lapso de vida de una civilización, lo que se ha hecho es utilizar la luz y otros mensajeros para recoger información sobre el universo lejano. En efecto, uno de los grandes triunfos de la ciencia moderna es haber sido capaces de aprender tantas cosas sobre el cosmos sin haber ido a ningún lado, basándose en la hipótesis de que las leyes de la naturaleza tal como las conocemos son válidas en todas partes. Hasta qué punto las leyes conocidas de la física se aplican al universo en su conjunto sigue siendo una cuestión abierta.

Los cosmólogos intentamos reconstruir la evolución del universo utilizando el mismo método que los astrónomos y astrofísicos: con ayuda de lápiz y papel o de ordenadores, aplicamos de manera matemáticamente coherente la física convencional para modelizar el sistema bajo estudio y comprobar si los resultados concuerdan con la observación. El sistema puede ser un cúmulo de galaxias o todo el universo. Si las predicciones del modelo concuerdan con las observa-

ciones, nos vamos a tomar unas cervezas. Si las predicciones no concuerdan, buscamos posibles errores matemáticos. Si no encontramos ninguno, buscamos posibles errores conceptuales. Si, finalmente, el modelo sigue sin concordar con las observaciones, añadimos nuevos fenómenos. Si los nuevos fenómenos mejoran los resultados, pedimos a nuestros colegas observacionales que inicien la búsqueda.

Una cosa que cualquier científico debería dudar en hacer es añadir fenómenos exóticos al modelo ya existente antes de haber agotado otras explicaciones más pedestres. Al pensar sobre los primeros instantes después del Big Bang, hum...

*

Llegados a este punto el lector quizá se pregunte dónde terminan exactamente la astronomía y la astrofísica y dónde empieza la cosmología. No hay una frontera bien definida, y por lo general los científicos que trabajan en uno de estos campos saben bastante sobre los otros. La diferencia es sobre todo de *escala*. Como dijimos, la astronomía y la astrofísica se ocupan tradicionalmente del comportamiento de las estrellas, planetas y galaxias, y más recientemente de los cúmulos de galaxias e incluso de los supercúmulos: cúmulos de cúmulos de galaxias. El cosmólogo adopta el encuadre más amplio imaginable (que comienza con algo del tamaño de los supercúmulos) y pregunta cómo aquello llegó a tener el aspecto del universo que observamos. Aunque la física que gobierna el comportamiento de las galaxias es la misma que la de las estrellas, en este libro no nos ocuparemos de estas ni de los planetas, y apenas tocaremos los agujeros negros, por muy fascinantes que sean, porque desde

la perspectiva cosmológica son tan pequeños que prácticamente son insignificantes.

Para los cosmólogos es extremadamente útil tener presentes las diferentes escalas astronómicas. A lo largo de todo el libro seguiré la práctica astronómica convencional de formular las distancias en función del tiempo que tarda la luz en recorrerlas. El lector seguramente sabe que la luz tarda unos ocho minutos, digamos que diez, en viajar del Sol a la Tierra. Podemos entonces decir que la Tierra está a una distancia de unos diez minutos luz del Sol. Análogamente, un año luz es sencillamente la distancia que viaja la luz en un año. Los astrónomos nunca convierten los años luz a millas o kilómetros, y el lector tampoco debe hacerlo. En lugar de eso debería tener cierta idea de las diferentes escalas halladas en el universo:

Cuatro años luz es la distancia a la estrella más cercana, aparte del Sol.

El diámetro de nuestra galaxia de la Vía Láctea es aproximadamente de 100 000 años luz.

La distancia diametral de un cúmulo de galaxias es de millones de años luz.

El tamaño de un supercúmulo de galaxias es de cientos de millones de años luz.

El tamaño del universo observable es de unos catorce mil millones de años luz.

Esta es la escala de la cosmología, la escala de la que se ocupa este libro.

¿Me puede aconsejar sobre el rímel y la sombra de ojos? No.

1. Gravedad, calabazas y cosmología

La cosmología es el estudio de cómo la gravedad determina la evolución del universo en su totalidad, por lo cual para comprender la cosmología es necesario comprender la gravedad.

La gravedad es, con diferencia, la más débil de las fuerzas naturales conocidas. Para el físico, una fuerza no es nada más que un empujón o un tirón efectuado sobre un objeto –no hay ningún «lado oscuro» que entre aquí en juego– y una de las principales razones por las que los físicos llaman a su disciplina la más fundamental de todas las ciencias es que, con el correr de los siglos, han aprendido que solo existen cuatro fuerzas fundamentales en la naturaleza. Una de ellas, la *fuerza nuclear fuerte*, la que mantiene unido el núcleo atómico, es con diferencia la fuerza natural más fuerte. Todos los núcleos atómicos están formados por neutrones y protones, y la repulsión eléctrica entre estos últimos, cargados positivamente, haría que el núcleo se desin-

tegrase de no ser por la fuerza nuclear fuerte que los mantiene unidos. La energía asociada a la fuerza fuerte es la que se libera en las explosiones atómicas. Sin embargo, la fuerza fuerte opera solamente dentro del núcleo atómico, que a escala cosmológica es extremadamente pequeño.

La segunda fuerza fundamental es la *fuerza nuclear débil*. Es miles de millones más débil que la fuerte y gobierna ciertas formas de desintegración radiactiva. El tritio, la versión extrapesada del hidrógeno, es radiactivo y se desintegra en una forma del helio; su tasa de desintegración viene determinada por la fuerza débil. Pero al igual que la fuerza fuerte, la débil opera solo dentro del núcleo atómico, que es insignificante a escala cosmológica.

En la vida diaria las fuerzas más importantes son la eléctrica y la magnética, que en realidad son dos aspectos de una única *fuerza electromagnética*. Esta fuerza es la responsable de toda la química y opera en cualquier dispositivo que requiera corrientes eléctricas, desde las tostadoras hasta los teléfonos móviles y todos los artilugios que forman parte de nuestro mundo. La fuerza electromagnética es la base de la civilización moderna. Pero para producir fuerzas eléctricas y magnéticas hacen falta cargas eléctricas. Como los cuerpos astronómicos (por ejemplo, los planetas) no tienen carga eléctrica, no ejercen fuerzas eléctricas ni magnéticas unos sobre otros.

En cambio, todos los objetos se atraen gravitatoriamente entre sí. Y a pesar de eso, la gravedad es increíblemente débil: el hecho de que el tirón gravitatorio de la Tierra entera no sea capaz de arrancar un imán de la nevera da idea de lo débil que es en comparación con la fuerza electromagnética. Los físicos lo formulan diciendo que la atracción gravi-

tatoria entre dos núcleos de hidrógeno (es decir, entre dos protones) es aproximadamente treinta y seis órdenes de magnitud más pequeña que la repulsión eléctrica entre ellos. En el diseño de la electrónica de consumo los ingenieros no tienen en cuenta la gravedad.

Ahora bien, como las fuerzas nucleares operan solo dentro del núcleo atómico, y como los cuerpos astronómicos son eléctricamente neutros, la fuerza que determina el destino del universo es la fuerza más débil de la naturaleza.

*

La teoría moderna de la gravitación es la teoría general de la relatividad de Albert Einstein, que a menudo se dice que es la teoría científica más bella de todas. Y es verdad.

Superficialmente, cabría considerar la relatividad general como un simple refinamiento de la teoría de la gravedad newtoniana, formulada por Isaac Newton hace casi cuatrocientos años. Consiste esta en una única ecuación inmortal que muestra cómo la fuerza gravitatoria entre dos objetos depende de sus masas y de la distancia que los separa. No hace falta siquiera escribir la ecuación para entender su mensaje: conociendo las masas de dos objetos y su separación podemos determinar exactamente la fuerza gravitatoria que ejerce uno sobre otro¹.

Dijimos antes que las fuerzas en física son simplemente empujones o tirones. Para ser más precisos, las fuerzas ha-

1. La ley de Newton da la fuerza gravitatoria F entre dos masas m_1 y m_2 como $F = G m_1 m_2 / r^2$, donde r es la distancia entre ellas y G es la *constante gravitatoria*, un número que hay que medir en el laboratorio y que determina la intensidad de la fuerza.

cen que los objetos cambien de velocidad, es decir, que se aceleren. Si la velocidad a la que se mueve un piano aumenta o disminuye, entonces existe una fuerza que está actuando sobre él. Si el piano se mueve a velocidad constante, no hay ninguna fuerza neta actuando sobre él.

Según Newton, si conocemos las fuerzas que actúan sobre un objeto, conocemos su aceleración y podemos entonces predecir completamente su comportamiento futuro. Así pues, si conociésemos las masas y las separaciones actuales de todas las estrellas del universo, sabríamos todo cuanto se puede saber sobre el futuro del universo —y también sobre su pasado—. Por esa razón, el universo newtoniano se equipara a menudo a un mecanismo de relojería. En su mayor parte, lo es.

*

La teoría newtoniana de la gravedad funciona tan bien en circunstancias ordinarias que durante dos siglos los astrónomos creyeron que explicaba por completo los movimientos del sistema solar. A mediados del siglo XIX aparecieron los primeros signos de que quizás no fuese así. Mercurio, como todos los planetas, gira alrededor del Sol en una órbita elíptica. Si Mercurio y el Sol fuesen los únicos objetos del sistema solar, el punto de máximo acercamiento de Mercurio al Sol, su *perihelio*, permanecería siempre en un mismo punto fijo del espacio. Sin embargo, los astrónomos observaron que el perihelio cambia gradualmente con el tiempo. Los cálculos indicaban que el tirón gravitatorio de los demás planetas del sistema solar podía explicar la mayor parte de esta diferencia, pero quedaba otra pequeña parte que seguía

tercamente inexplicada. Muchas fueron las teorías propuestas para explicar la anomalía, pero el fantasma en la máquina siguió siendo un misterio durante más de medio siglo.

Cuando Einstein empezó a trabajar sobre la relatividad general a principios del siglo XX, aparte de la anomalía del perihelio de Mercurio no había ninguna otra prueba observacional de que la gravedad newtoniana pudiese ser inadecuada. Sin embargo, ahí estaba la teoría del campo electromagnético de James Clerk Maxwell.

En primer lugar hay que saber que la teoría de Newton es una teoría de *partículas y fuerzas*. En un huerto hay dos calabazas. Podemos imaginárnoslas como dos partículas que ejercen una sobre otra una fuerza gravitatoria a través del huerto. Análogamente, podemos idealizar la Tierra y la Luna como partículas que ejercen una atracción gravitatoria mutua a través del espacio. La teoría de Newton no explica en ninguno de los dos casos cómo viaja la fuerza de una partícula a la otra. Por esa razón, la gravitación newtoniana se dice a menudo que es una teoría de *acción a distancia*, donde *acción* significaba «fuerza» en tiempos de Newton.

Igual de importante es que la fuerza gravitatoria entre los dos objetos se transmite evidentemente de forma *instantánea*; si desapareciera el Sol, no quedaría nada alrededor de lo cual pudiesen girar los planetas, que de inmediato, sin ninguna dilación, saldrían volando al espacio.

*

En lugar de un huerto imaginemos ahora que las calabazas flotan en un estanque. Enseguida vemos que la cosa ha cambiado. El agua del estanque está compuesta por un nú-

mero enorme de moléculas, pero estas son tan pequeñas que pasamos de ellas y pensamos en cambio en el agua como algo que tiene una cierta densidad y presión en cada punto. La densidad y la presión son magnitudes «globales», que no hacen referencia a las partículas individuales. Esta es la firma característica de un *campo*. El aire en una habitación se puede considerar como un campo. También la superficie elástica de un trampolín. Un enjambre de abejas se parece en muchos aspectos a un campo.

La idea del campo proporciona un mecanismo natural para la transmisión de fuerzas. Las calabazas, empujadas para que oscilen hacia arriba y hacia abajo, crean pequeñas perturbaciones que se propagan por el estanque en la forma de ondas acuáticas. Estas ondas son perturbaciones locales que viajan por el campo de agua a velocidades finitas. En cambio, en la gravedad newtoniana hay que imaginar fuerzas que de algún modo se transmiten a través de grandes vacíos a velocidad infinita.

«¡Objeción!», exclama, educadamente, el lector: en la atracción gravitatoria entre la Tierra y la Luna no intervienen ondas. Es cierto. Todas las analogías acaban por fallar. Al pensar en la permanente atracción gravitatoria entre los cuerpos no importa mucho que imaginemos fuerzas o campos. Sin embargo, los campos existen; si se esparcen limaduras de hierro sobre un trozo de papel colocado encima de un imán, se observa claramente la forma del campo magnético. En términos generales, la idea de campo es tan potente que prácticamente todas las modernas teorías de la física fundamental son teorías de campos. Sin el concepto de campo es virtualmente imposible describir las ondas electromagnéticas y gravitacionales.

Examinando las leyes que gobiernan los campos eléctrico y magnético, Maxwell demostró que estos campos podían propagarse a través del espacio vacío en la forma de una onda electromagnética que viaja a 3×10^8 metros por segundo². Este descubrimiento, publicado en 1865, le dejó asombrado, porque la cifra era casi exactamente igual a la velocidad de la luz, que para entonces ya se había medido con precisión. La conclusión —«difícilmente evitable», escribió— era que la *luz misma* debía ser una onda electromagnética que viaja, no a velocidad infinita, sino a una velocidad finita de 3×10^8 metros por segundo. La predicción de Maxwell, el triunfo teórico más grande de la física del siglo XIX, se vio confirmada décadas más tarde por el descubrimiento de las ondas de radio.

A principios del siglo XX, algunos físicos intentaron crear teorías de campos de la gravedad basadas en el electromagnetismo de Maxwell. Todas ellas fracasaron, porque la gravedad no se comporta exactamente como el electromagnetismo. Einstein fue el primero en entender la diferencia y el primero en comprender bien la gravedad. Para ver cómo su teoría, a la que llamó la relatividad general, describe el campo gravitatorio, debemos tener primero una idea de la teoría elaborada antes por él y que sirvió de punto de partida para la relatividad general: la teoría especial de la relatividad.

¿Qué es relativo y qué no lo es?

2. La notación científica es indispensable en física y astronomía. Para quien no esté familiarizado con ella, el exponente indica el número de potencias de diez, o cuántos ceros van detrás del uno. Así, 10 se puede escribir como 10^1 , 100 como 10^2 y 1000 como 10^3 . 3×10^8 es 300 000 000, donde se echa de ver por qué se utiliza la notación científica.