



GUIDO TONELLI

GÉNESIS

El gran relato de la creación
del universo



Ariel

Guido Tonelli

Génesis

El gran relato de la creación del universo

Traducción de Carlos Gumpert

Ariel

Publicado originalmente como *Genesi: il grande racconto delle origini*
en mayo de 2019 por Giangiacomo Feltrinelli Editore, Milán.

Primera edición: enero de 2021

© 2019, Giangiacomo Feltrinelli Editore
© 2021, Carlos Gumpert Melgosa, por la traducción

Derechos exclusivos de edición en español:
© Editorial Planeta, S. A.
Avda. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona
Editorial Ariel es un sello editorial de Planeta, S. A.
www.ariel.es

ISBN: 978-84-344-3279-6
Depósito legal: B. 21.758-2020

Impreso en España

El papel utilizado para la impresión de este libro está calificado como
papel ecológico y procede de bosques gestionados de manera sostenible.

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación
a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio,
sea este electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos,
sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados
puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal).
Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos)
si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.
Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com
o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47.

Índice

<i>Introducción</i> . El gran relato de los orígenes.	13
En el principio hubo el vacío	30
Día 1. Un soplo imparable produce la primera maravilla	54
Día 2. El delicado toque de un bosón lo cambia todo, para siempre.	74
Día 3. Nacimiento de los inmortales.	102
Día 4. Y por fin se hizo la luz.	118
Día 5. Se enciende la primera estrella	136
Día 6. Y el caos se disfrazó de orden.	159
Día 7. Un bullir de formas complejas	179
Lo que nos hace humanos.	201
<i>Epílogo</i> . La masacre de la Asunción	217
<i>Agradecimientos</i>	221

En el principio hubo el vacío

En el principio hubo el vacío: eso es, hemos hecho lo más complejo, dar una respuesta, de inmediato, a la más difícil de las preguntas: ¿qué había antes del Big Bang?

En aras del rigor, la pregunta no está bien planteada. Como veremos en seguida, el espacio-tiempo entra en escena junto con la masa-energía, por lo que no hay un *antes*, no existe reloj alguno *fuera* del universo que aún ha de nacer. En todo caso, en términos narrativos, podemos hacer caso omiso de esta dificultad lógica e ir al meollo de la cuestión.

Aceptando la paradoja de preguntarnos qué había *antes* de que naciera el tiempo, nos situamos imaginariamente en el *no-lugar* del que supuestamente se originó todo el espacio; fantaseamos, pues, nosotros, seres materiales que precisamos aire para respirar y luz para ver, con poder estar presentes allí, cuando aún no hay rastro de materia o energía, a la espera de asistir al nacimiento de todo y poder verlo con nuestros propios ojos.

Frente a nosotros se extiende el vacío, un sistema físico muy peculiar que, a pesar de un nombre francamente engañoso, está lejos de encontrarse vacío. Las leyes de la física lo llenan de partículas virtuales que aparecen y desaparecen a velocidades frenéticas, lo abarrotan de campos de energía

cuyos valores fluctúan continuamente alrededor de cero. Cualquiera puede pedir prestada energía del gran banco del vacío y vivir una existencia tanto más efímera cuanto mayor sea la deuda que ha contraído.

De este sistema, de estas fluctuaciones, puede nacer un universo material que, en realidad, sigue siendo un vacío, pero un vacío que ha sufrido una maravillosa metamorfosis.

UN UNIVERSO GIGANTESCO Y EN EXPANSIÓN

Hoy nos resulta difícil no sonreír ante las ingenuas imágenes que los mejores científicos de distintas épocas concibieron antes de que tener a su disposición los telescopios modernos.

La palabra *universo* contiene las raíces latinas de *unus*, uno, y *versus*, participio pasado de *vertĕre*, girar. Lo empleamos como sinónimo del todo, por más que su significado literal sea «aquello que gira por completo en la misma dirección», es decir, contiene un residuo de las antiguas creencias que atañen a un sistema estable y ordenado de cuerpos en rotación. Este prejuicio aúna las antiguas concepciones de Aristóteles y Ptolomeo con los modelos más modernos de Copérnico y Kepler.

El universo geocéntrico y el heliocéntrico son absolutamente diferentes desde un punto de vista conceptual. Durante casi dos mil años los estudiosos de todo el planeta se prodigaron en cálculos y disputas interminables sobre el movimiento de las maravillosas esferas concéntricas que albergaban la Luna, el Sol, los planetas y las estrellas fijas. Luego, de repente, esta visión del mundo se derrumbó.

Retirar la Tierra del centro de la creación no era un simple detalle. Para la sociedad del siglo XVII supuso una terrible conmoción cultural, filosófica y religiosa. A partir de ese momento el mundo nunca volvió a ser el mismo. Sin

embargo, si miramos las cosas desde cierta distancia, los dos sistemas, que parecen tan irreconciliables que en su nombre se llegó a derramar sangre, tienen una estructura muy parecida. Ambos describen un universo inmutable, estacionario, una maquinaria perfecta que garantiza una armónica, perenne rotación. Aunque lo que la haga funcionar sea «el amor que mueve el sol y las demás estrellas» o la fuerza gravitacional de Galilei y Newton, la esencia no cambia.

Este prejuicio de un universo eterno e inmutable, perfecto, y por lo tanto idéntico a sí mismo *ab initio*, llega casi hasta nuestros días. Es sorprendente encontrarlo incluso, a principios del siglo xx, en las primeras formulaciones de la cosmología relativista.

En 1917, Albert Einstein, al desarrollar las consecuencias de su teoría de la relatividad general, postula un universo homogéneo, estático, curvado espacialmente. Masa y energía deforman el espacio-tiempo y tienden a hacerlo colapsar en determinado punto, pero si se agrega a la ecuación un término positivo que compense su tendencia a contraerse, el sistema permanece en equilibrio. El comienzo de la cosmología moderna nace con esta desviación. Para evitar el final catastrófico del universo, que se produciría necesariamente en presencia de la mera gravedad, se inventa un término arbitrario. En su deseo de mantener el prejuicio de la estabilidad y la persistencia en vigor durante milenios y del que evidentemente era prisionero, Einstein introduce a la fuerza lo que llamamos la *constante cosmológica*, una especie de energía del vacío, positiva, que tiende a impulsar todo hacia el exterior y que, por lo tanto, contrarresta supuestamente la atracción gravitacional, garantizando así la estabilidad del conjunto.

Ahora que sabemos que el universo está formado por cientos de miles de millones de galaxias, causa impresión constatar que, en las dos primeras décadas del siglo pasado, los científicos de aquel momento, y entre ellos, algunas de

las mentes más brillantes de la historia, seguían pensando que el universo consistía únicamente en la Vía Láctea. El lento movimiento concéntrico de los cuerpos de esa galaxia podía sugerir por lo tanto la idea de un universo como un sistema estable, armonioso y ordenado. No tardará todo ello en verse puesto en cuestión por las nuevas observaciones, pero la ruptura radical con las viejas concepciones se verá anticipado por la genial intuición de un joven científico belga.

En 1927, Georges Lemaître tiene treinta y tres años, es un sacerdote católico, licenciado en Astronomía por Cambridge, y está completando su doctorado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). El joven científico es uno de los primeros en comprender que las ecuaciones de Einstein también pueden describir un universo dinámico, un sistema de masa constante pero en expansión, es decir, cuyo radio crece con el tiempo. Cuando presenta su idea a su colega, más anciano y prestigioso, el comentario de Einstein es tremendo: «Sus cálculos son correctos, pero su comprensión de la física es abominable». El prejuicio milenario de concebir el universo como un sistema estable está tan arraigado que incluso la mente más elástica e imaginativa de la época rechaza la idea de que pueda expandirse y por lo tanto de que todo tuviera un principio.

Harán falta años de feroces discusiones y confrontaciones antes de que esta extraordinaria novedad se consolide entre los científicos; y tendrá que pasar aún más tiempo para que se haga de dominio público.

La clave de lo ocurrido la sugiere el propio Lemaître quien, en el artículo en el que propone su nueva teoría, cita la medición de la velocidad radial de las nebulosas extragalácticas.

En esos años, la atención de los astrónomos se estaba centrando en esos extraños objetos, parecidos a las nubes, que se interpretaban como grupos de estrellas agregadas a

aglomerados de polvo o gas. Hoy sabemos que son galaxias, cada una de las cuales contiene miles de millones de estrellas, pero con los telescopios de la época no podían distinguirse demasiados detalles.

Para calcular con qué velocidad se movía una estrella, o un cuerpo luminoso genérico, los astrónomos habían aprendido hacía mucho tiempo a usar el *efecto Doppler*. El mismo fenómeno que podemos experimentar con las ondas acústicas emitidas por la sirena de una ambulancia, puede aplicarse a las ondas luminosas. Cuando la fuente se aleja, la frecuencia de las ondas que recibimos se reduce: el sonido de la sirena se vuelve más grave, así como el color de la luz visible se vuelve rojo. Analizando el espectro de frecuencias luminosas emitidas por los distintos cuerpos celestes puede medirse para cada uno de ellos este desplazamiento hacia el rojo, el *red shift* precisamente y obtener la velocidad radial con la que se están alejando.

Pero no resultaba fácil medir la distancia de estas formaciones y entender por lo tanto si se hallaban dentro de nuestra galaxia o no.

La solución la encontró Edwin Hubble, un joven astrónomo que trabajaba en el observatorio del Monte Wilson, en California, equipado por entonces con el telescopio más potente del mundo.

La técnica utilizada se basaba en el uso de las Cefeidas, estrellas pulsantes de brillo variable. Cuando Hubble comenzó su trabajo, no hacía muchos años que había muerto Henrietta Swan Leavitt, una de las primeras astrónomas americanas, una joven científica que hizo una gran contribución en este campo de investigación sin recibir, como suele suceder en estos casos, el reconocimiento que se merecía. En efecto, a principios del siglo xx, se consideraba impensable que una mujer utilizara un telescopio y el trabajo de las rarísimas jóvenes científicas consistía en actividades de servicio. A Leavitt se le asignó la función, completamen-

te secundaria y mal pagada, de computadora humana: su cometido, en otras palabras, consistía en examinar, una tras otra, miles de placas fotográficas que contenían imágenes tomadas mediante los telescopios y anotar las características de estrellas y objetos celestes. En concreto, se le confió la tarea de medir y catalogar la luminosidad aparente de las estrellas.

La joven astrónoma centró sus estudios en las estrellas de luminosidad variable perteneciente a la Pequeña Nube de Magallanes, una nebulosa que, en aquel momento, se creía que formaba parte de nuestra galaxia. La genial observación de Leavitt fue que las estrellas más luminosas eran también las que tenían el período de pulsación más largo. Una vez establecida esta correlación, podía obtenerse una estimación del brillo absoluto de una estrella, lo que permitía medir su distancia. La luminosidad de un objeto varía con el inverso del cuadrado de la distancia del observador, de modo que, conociendo la intensidad luminosa absoluta de la muestra, basta con medir la luminosidad aparente para obtener la distancia.

Leavitt midió la relación entre luminosidad y período de las Cefeidas de la Pequeña Nube de Magallanes y con la hipótesis de que las estrellas se hallaban aproximadamente a la misma distancia pudo construir la escala de luminosidad intrínseca a partir de la aparente que se registraba en las placas.

Gracias a la increíble intuición de una joven y brillante astrónoma, pudo disponerse de *candele standard*, es decir, fuentes luminosas de intensidad conocida, a través de las cuales era posible obtener una medida absoluta de su distancia.

Eso fue lo que hizo Hubble, quien usó las Cefeidas de la nebulosa de Andrómeda para llegar a la conclusión de que esos cuerpos celestes se hallaban a distancias demasiado grandes para formar parte de nuestra Vía Láctea.

Lemaître estaba al corriente de las primeras mediciones realizadas por Hubble, que no solo situaban esas nebulosas fuera de nuestra galaxia, sino que les atribuían una impresionante velocidad de alejamiento. Su teoría del universo en expansión permite explicar estas nuevas observaciones siempre que se acepte la idea de que se trata de un sistema enorme, monstruosamente mayor de lo que se pensaba hasta entonces. Una estructura gigantesca en la que están presentes innumerables galaxias parecidas a la nuestra, y donde todo se aleja de todo.

Después de haber colocado durante milenios la Tierra en el centro del universo y de haber aceptado a regañadientes que nuestro planeta es uno de los muchos que giran alrededor del Sol, se derrumba de repente también la última ilusión. El sistema solar y nuestra querida Vía Láctea no tienen una ubicación especial. Somos un componente insignificante de una galaxia anónima, una de las muchas que pueblan, infinitas, todo el universo. Como si eso no fuera suficiente, todo el sistema evoluciona con el tiempo: como todas las cosas materiales, ha tenido un comienzo y probablemente también tendrá un final.

EL BIG BANG

La intuición de Lemaître, confirmada por las mediciones de Hubble, sentará las bases para la nueva visión del mundo. En su artículo original, en francés, el sacerdote astrónomo se atrevió a establecer una relación de estricta proporcionalidad entre distancia y velocidad de recesión de los objetos astronómicos. De ser correcta su idea del universo en expansión, las galaxias más distantes tendrían que alejarse de nosotros a velocidades más altas, es decir, mostrarían un corrimiento al rojo mayor. Y fue ese precisamente el resultado que obtuvo Hubble, a medida que su catálogo de

observaciones iba haciéndose más rico. Pero la intuición de Lemaître tardó mucho en ser tomada en cuenta porque la revista belga en la que publicó el artículo no era muy conocida. Por esta razón, hasta hace muy poco, el mundo científico siempre ha llamado a esta correlación *ley de Hubble*. Gracias a un paciente trabajo de reconstrucción, la contribución del científico belga ha sido ampliamente reconocida. Hicieron falta casi cien años, pero hoy a la relación que nos permitió establecer la naturaleza dinámica del universo se le llama, más apropiadamente, *ley de Hubble-Lemaître*.

A principios de los años treinta, ante la gran cantidad de observaciones experimentales, hasta Einstein acabará por abandonar su escepticismo inicial. La leyenda sostiene que, al admitir de mala gana que el sacerdote belga y el astrónomo estadounidense tenían razón, el gran científico se lamentó por no haberlo entendido antes: «La constante cosmológica fue el mayor error de mi vida».

A partir de un estado inicial en rápida expansión, no era necesario introducir esta corrección *ad hoc*, que desapareció de hecho durante muchas décadas de la ecuación fundamental de cosmología. Ironías de la suerte, la situación se revertirá nuevamente en la segunda mitad del siglo xx cuando, con el descubrimiento de la energía oscura, tuvo que ser reintroducido ese término que tanto había atormentado a su creador.

El primero en plantear la hipótesis de que en realidad la expansión del universo podría acelerarse fue una vez más Lemaître quien, como era de esperar, dejó en la ecuación la constante cosmológica de Einstein, si bien con un valor residual. Lemaître describió el nacimiento del universo como un proceso que tuvo lugar entre diez y veinte mil millones de años atrás, a partir de un estado inicial que llamó *átomo primordial*. Su hipótesis emparejaba las teorías científicas más avanzadas del momento con los numerosos relatos mitológicos que situaban el origen de todo en una especie de

huevo cósmico pero era la primera en establecer esa conexión entre microcosmos y macrocosmos que demostrará ser extremadamente fructífero en las siguientes décadas.

Desde su formulación, la nueva teoría despertó muchas dudas. La opinión pública mundial estaba ocupada en asuntos de muy distinto cariz: la gran crisis del 29, la eclosión del fascismo y del nazismo en Europa y las numerosas señales de que el mundo entero estaba precipitándose hacia otro conflicto mundial. En todo caso, en los círculos científicos el escepticismo ante la nueva hipótesis cosmológica estaba muy arraigado. No pocos científicos de renombre se negaban a aceptar la propia idea de un *comienzo* del espacio-tiempo, de un *nacimiento* del universo. Se trataba de algo tremendamente parecido al Génesis bíblico, al concepto de creación propugnado por varias religiones. Como si eso fuera poco, el primero en defender la nueva teoría había sido un científico-sacerdote, y además católico romano.

La idea de un universo eterno, de un estado estacionario no creado y perenne, que Aristóteles fue el primero en defender, todavía fascinaba a muchos científicos. Uno de los más conocidos era Fred Hoyle, un astrónomo británico que simplemente consideraba repugnante la teoría propuesta por Lemaître y no abandonó esta convicción hasta su muerte, en 2001. Fue él, en una transmisión de radio de la BBC en 1949, el que acuñó el primero la expresión, despectiva desde su punto de vista, de «teoría del Big Bang». Ironías de la suerte, la imagen de la *gran explosión*, que en las intenciones de Hoyle debería haber ridiculizado esa teoría cosmológica, acabó por penetrar tan profundamente en el imaginario colectivo que contribuyó en gran medida a su éxito.

Uno de los bastiones de oposición más tenaces fue la ciencia soviética. Durante décadas, los científicos de la URSS tacharon el Big Bang de teoría pseudocientífica e idealista que teorizaba una especie de creación, demasiado similar a

la descrita por la religión para no despertar sospechas. No tomaban en consideración que Lemaître siempre había mantenido bien separado el campo de la ciencia del de la fe hasta el extremo de reaccionar con horror cuando, en 1951, Pío XII no pudo resistirse a la tentación de aludir al Big Bang descrito por los científicos como el momento bíblico de la creación. Fue el intento del papa de proclamar una suerte de validación científica del creacionismo para fortalecer la base racional de la fe, a lo cual Lemaître se opuso con energía.

Lo que determinó el éxito definitivo de la teoría del Big Bang fueron, una vez más, los resultados experimentales. Entre los desarrollos teóricos de la nueva hipótesis cosmológica se produjo, en torno a los años cincuenta, la predicción de una radiación difundida en todo el universo, ondas fósiles, residuos del momento en el que los fotones se habían separado irremediamente de la materia para continuar fluctuando por todas partes a nuestro alrededor. Ondas electromagnéticas muy débiles, estiradas durante miles de millones de años por la expansión del espacio-tiempo, una energía sutil que daba al vacío interestelar una temperatura característica de algunos grados Kelvin.

El sensacional descubrimiento lo realizaron, casi por casualidad en 1964, los astrónomos estadounidenses Arno Penzias y Robert Wilson. A los dos les había costado semanas conseguir volver a poner en funcionamiento una antena que querían utilizar para realizar observaciones de radioastronomía en la región de microondas, pero no habían sido capaces de eliminar una molesta señal que parecía venir de todas las direcciones. Habían supuesto inicialmente que podía tratarse de una interferencia debido a una emisora de radio que transmitía en las cercanías del laboratorio; luego habían pensado en disturbios electromagnéticos relacionados con actividades de distinto signo en la cercana ciudad de Nueva York; después de haber comprobado que

tampoco tenía nada que ver la pareja de palomas que habían anidado en la antena recubriendo una parte del aparato con cierto material dieléctrico blanquecino, más prosaicamente llamado *caca de paloma*, se rindieron y publicaron sus resultados en un breve carta. El descubrimiento del fondo cósmico de radiación de microondas (Cosmic Microwave Background, CMB) proveniente de todas las direcciones y la observación de que el universo tenía una temperatura de unos pocos grados Kelvin, es decir, alrededor de -270 grados centígrados, marcaron el éxito incuestionable de la nueva teoría. Penzias y Wilson habían grabado el eco del Big Bang, la madre de todas las catástrofes, el evento primigenio, la prueba de que todo comenzó hace 13.800 millones de años.

UN UNIVERSO NACIDO DEL VACÍO

En realidad, incluso en los años de su mayor éxito, cuando el término ya había entrado en el lenguaje común y se hablaba del Big Bang en transmisiones televisivas o en tebeos infantiles, los científicos no acababan de despejar todas sus dudas.

Aunque las mediciones cada vez más precisas del CMB fueron añadiendo piezas cada vez más convincentes al rompecabezas, quedaba por resolver una cuestión de fondo. En pocas palabras, la teoría tradicional del Big Bang ocultaba un problema gigantesco: si el universo había nacido de un punto donde se concentraban una energía y masa monstruosas, un sistema extremadamente denso y cálido, que se expande de forma furibunda, ¿qué clase de fenómeno físico había concentrado en ese punto toda aquella abundancia? Es, en cierto sentido, la misma pregunta a la que alude, en tono de broma, Italo Calvino en su breve cuento «Todo en un punto», de las *Cosmicómicas*: «Cada punto de cada uno

de nosotros coincidía con cada punto de cada uno de los demás en un único punto que era aquel en el que estábamos todos». Una sugestión parecida había inspirado a Jorge Luis Borges, años antes, en su hermoso relato *El Aleph*, que toma su título de la primera letra del alfabeto hebreo, que también indica el número primordial que contiene todos los demás números, para contar la historia de una pequeña y misteriosa esfera en la que podía verse un universo entero.

En definitiva, bajo la superficie de una teoría bien establecida se ocultaba una enorme cuestión: ¿qué mecanismo podía haber llevado a esta condición casi excepcional, un punto adimensional, con densidad y curvatura infinitas, es decir, a eso que los físicos llaman *una singularidad*?

En principio, había una solución simple, intrínsecamente elegante, al alcance de la mano. Las mismas ecuaciones que describían una expansión contrastada por la atracción gravitacional podían utilizarse para el proceso inverso, es decir, una contracción imparable que inevitablemente llevaría al Big Crunch, la enorme implosión.

Bajo determinadas condiciones, la expansión del universo puede verse refrenada por la atracción gravitacional que involucra a la materia y a la energía, hasta verse anulada por completo para dar origen más tarde a una sucesiva fase de contracción. En este caso, lenta pero inexorablemente, aumentaría la concentración de las galaxias en el interior de los cúmulos y crecerían por doquier, en todos los rincones del universo, tanto la densidad de la materia como la temperatura media. Y así todo acabaría dando lugar a nuevas y enormes concentraciones de agujeros negros, radiaciones y materia ionizada que solo podrían colapsar catastróficamente en una región de dimensiones cada vez más pequeñas, virtualmente puntiforme. Y así tendríamos la singularidad que dará lugar a otro Big Bang del que nacerá un nuevo universo, anillo de una cadena infinita de acaecimientos de expansión y contracción. El aliento de un in-

menso acordeón que construye sus diferentes melodías en ciclos temporales de decenas de miles de millones de años.

La hipótesis de extender al universo material este ciclo de vida, muerte y renacimiento, sin principio ni fin, trae a la memoria algunos conceptos comunes a muchas filosofías orientales. El propio universo estaría sujeto al *Samsāra*, la rueda de la existencia que aprisiona a los seres vivos en una serie de innumerables reencarnaciones. Una solución simétrica y elegante que tendría el mérito de resolver con levedad la aparente violación de la conservación de la energía: ¿quién ha concentrado en la singularidad todo el universo?

Esta vía de salida estuvo abierta durante varias décadas, pero empezó a perder consistencia a medida que astrónomos y astrofísicos lograron proporcionar mediciones más precisas de la velocidad de recesión de las galaxias y del fondo de radiación cósmica, nuevos resultados que han dado lugar a la cosmología de precisión.

Hace ya tiempo que hemos comprendido que las estrellas nos cuentan su historia con un lenguaje mucho más rico y articulado de lo que nos imaginábamos. Muy pronto, junto a los telescopios ópticos más potentes se instalaron parábolas gigantes orientadas hacia el espacio más profundo, monstruosas orejas que aguzaban el oído para escuchar señales de radio provenientes de estrellas desconocidas, o emitidas desde lejanas galaxias: la radioastronomía. Así se han descubierto familias enteras de nuevas fuentes, objetos misteriosos que lanzan señales de radio características y para los cuales se eligen nombres exóticos, como *púlsar* o *cuásar*. Harán falta décadas de investigación para comprender que, detrás de algunos de estos fenómenos, hay nuevos estados de agregación de la materia: la fuerza de gravedad que ruge en el corazón de los cuerpos celestes más masivos resquebraja la materia en sus componentes más diminutos, produciendo las densidades monstruosas de las estrellas de neutrones o de los agujeros negros.

La evidencia de que el cosmos nos inunda con fotones de todas las longitudes de onda, desde las decenas de metros de las ondas de radio hasta las distancias subatómicas de las explosiones de rayos gamma más energéticas, ha impulsado a los científicos a construir aparatos cada vez más sofisticados, anclados en la tierra o lanzados a la órbita terrestre, capaces de grabar todo el espectro de las ondas electromagnéticas. Se han construido mapas cada vez más precisos del cosmos y sus innumerables fuentes de radiación en todas las frecuencias. La impresionante mole de mediciones nos ha permitido estudiar el universo en su conjunto, como un sistema físico que puede ser sometido a investigación y responde a las preguntas típicas de estos casos: ¿cuánta energía total tiene? ¿Y cuánto valen el impulso, el momento angular y la carga total?

A medida que los datos se vuelven cada vez más precisos y se reducen los errores de las mediciones, la imagen resultante presenta aspectos sorprendentes. Los datos nos dicen que la expansión del universo no se detendrá, nada indica que revierta su carrera para regresar al Big Crunch. La densidad media del universo no es suficiente para superar ese valor crítico más allá del cual dominaría la gravedad. Por lo tanto, es necesario abandonar la muy atractiva idea del universo cíclico y así volvemos a tener el problema de explicar la singularidad inicial.

Pero he aquí que, de forma completamente inesperada, aparece de inmediato una solución aún más elegante: el universo está extremadamente cerca de la condición de total homogeneidad e isotropía. La increíble uniformidad del fondo de radiación cósmica nos dice que el universo no tiene una curvatura apreciable; la distribución angular de esta radiación nos dice que el espacio sigue las leyes de la geometría euclidiana: un rayo de luz que cruza una región del universo no perturbada por masa y energía viaja en línea recta. Es lo que se llama un *universo plano*, sin curvatura.

Y dado que la distribución de masa y energía del universo está intrínsecamente relacionada con la curvatura del espacio y su geometría, según las leyes establecidas por la relatividad general, podemos llegar así a la asombrosa conclusión de que un universo plano como el nuestro es un sistema de energía total nula.

En otras palabras, la energía positiva debida a la masa y la energía presentes en el universo y la negativa debida al campo gravitacional se anulan. Si alguien intentara calcular la energía total del sistema del universo, debería comenzar por transformar en energía la masa de todas las estrellas de nuestra galaxia y multiplicar el resultado por los cien mil millones de galaxias; después deberíamos añadir la energía oscura y la debida a la materia oscura, de la que hablaremos en profundidad más adelante, y por último habría que transformar en energía todas las formas de materia y de radiación que vagan por el universo: gas intergaláctico y fotones, neutrinos y rayos cósmicos, hasta llegar a las ondas gravitacionales. El resultado final de este cálculo formaría sin duda un enorme número positivo.

Ahora, armados de paciencia, tendríamos que tomar en consideración la contribución a la energía total debida al campo gravitacional, que es una contribución negativa. La fuerza de atracción entre dos cuerpos, ya sean la Tierra y el Sol o dos galaxias distantes, produce un sistema vinculado, es decir, los dos cuerpos quedan atrapados en un sistema de energía potencial negativa; para liberar a uno de los dos componentes es necesario proporcionarle energía positiva, generalmente energía cinética, es decir, acelerar uno de los dos cuerpos hasta que alcance la velocidad de fuga, el valor que le permitiría alcanzar distancias potencialmente infinitas, escapando definitivamente a la atracción gravitacional del socio. Eso es lo que sucede cuando queremos lanzar desde la Tierra un satélite de exploración hacia los confines del sistema solar.

Dado que la gravedad afecta a toda la distribución de masa y energía del universo, el número negativo que se obtiene del conjunto de estados vinculados es también gigantesco.

Ahora todo lo que queda es establecer la diferencia entre los dos números, ambos monstruosamente grandes, y el resultado es sorprendente: compatible con cero. En resumen, la energía total del sistema universo es la misma que la del sistema vacío.

Todo esto no puede ser mera coincidencia. Mucho menos considerando que algo parecido se verifica para la carga total del universo, para su impulso y para el momento cinético. Todos rigurosamente compatibles con cero. Recapitulando, el universo tiene una energía nula, una cantidad de movimiento nula, un momento cinético nulo, una carga eléctrica nula: características todas ellas que lo hacen parecerse enormemente al estado del vacío. Llegados a este punto, los científicos se rinden: «Parece un pato, camina como un pato, aletea como un pato: para nosotros es un pato».

En resumen, los datos de observación más sofisticados y completos recogidos hasta ahora nos dicen de manera coherente que el misterio del origen del universo está oculto en la más simple de las hipótesis, que, entre otras cosas, resuelve a la vez la pregunta que parecía hacer vacilar la hipótesis del Big Bang. En un universo de energía total nula, no hay necesidad de ningún extraño mecanismo que concentre en la singularidad inicial enormes cantidades de materia y energía, porque en ese punto había energía nula y el sistema que nació de él, y que llamamos el *universo*, sigue teniendo energía nula. El físico y cosmólogo Alan Guth, uno de los primeros partidarios de esta teoría, la define como el más hermoso ejemplo de un enorme *almuerzo gratis* proporcionado por el vacío cuántico.

Que el universo entero proviene del vacío o, mejor dicho, que sigue siendo lisa y llanamente un estado de vacío

que ha sufrido una metamorfosis parece ser la hipótesis más convincente de la cosmología moderna; o por lo menos la más congruente con la innumerable serie de observaciones recogidas hasta ahora.

¿VACÍO O NADA?

Pero ¿qué es el vacío? Muchos identifican el vacío con la nada. Un error garrafal. La nada es un concepto filosófico, una abstracción, el opuesto irreducible del ser que nadie ha sabido definir mejor que Parménides: «El ser es, y no es posible que no sea; el no ser no es, y es necesario que no sea».

La nada-vacío evoca miedos ancestrales como la pesadilla común y recurrente de caer en un pozo sin fondo; la vacuidad es sinónimo de carencia de valor: un alma vacía, un discurso vacío. La asociación del concepto de vacío con la nada nace también de la asonancia inevitable, para aquellos que pertenecen a la cultura occidental, entre la teoría cosmológica de un universo que nace del vacío y el concepto judeocristiano de la creación del mundo *ex nihilo*, de la nada. En realidad, como veremos dentro de poco, se trata de conceptos casi opuestos; el vacío como sistema físico es, en cierto sentido, lo contrario de la nada.

El concepto de vacío tiene en cambio muchos puntos de contacto con el cero. El término proviene del latín *zephyrum*, que aparece por primera vez en Occidente en 1202. En uno de sus escritos, el gran matemático Leonardo Fibonacci traduce de esta manera en latín la cifra árabe *sifr*, que significa precisamente cero o vacío, por más que en el equivalente latino haya un eco del mito griego de *Zephyros*, el viento ligero que anuncia la primavera.

En árabe se había mantenido el significado original del término que indicaba el número cero, introducido por los indios, que lo llamaban *sunya*, es decir, *vacío*. La misma raíz

se encuentra en la *Sūnyatā*, o «doctrina del vacío», concepto fundamental del budismo tibetano según el cual todos los cuerpos materiales están privados en realidad de una existencia propia e independiente.

Fueron los indios quienes introdujeron por primera vez el concepto de un cero-vacío. La expresión aparece por primera vez en una obra escrita en sánscrito en el 458 d. C. Su título es *Lokavibhaga*, cuyo significado literal es «Las partes del universo», y es curioso que sea un tratado sobre cosmología; casi para establecer, desde el principio, una conexión entre el concepto de vacío y el nacimiento del universo.

Esto no debe sorprendernos, dado el papel que juega el vacío en la cosmogonía india y en los mitos de la creación. Shiva es el dios creador y al mismo tiempo destructor del universo. Cuando danza, toda la Tierra tiembla y el universo entero se hace añicos, ardiendo bajo la presión del ritmo divino. Todo se disuelve hasta concentrarse en el *bindu*, el punto metafísico situado fuera del espacio y el tiempo cuyo emblema colorado se ponen en la frente muchas mujeres hindúes. Después, el punto se va disolviendo lentamente y todo se dispersa en el vacío cósmico. El ciclo se reanuda cuando Shiva decide crear un nuevo universo y empieza a danzar de nuevo. Una vez más, el ritmo divino produce vibraciones cada vez más amplias del vacío que acaba por hincharse espasmódicamente dando lugar a un nuevo universo que ocupa su lugar en el ciclo infinito de la creación y la destrucción.

Esta familiaridad de los indios con el concepto de vacío nos permite entender mejor por qué fueron los primeros en conferir al cero las propiedades de número a todos los efectos e, inspirándose en el sistema posicional ya adoptado por los babilonios, decretaron su gloria definitiva.

Todo lo contrario que los griegos, para quienes cero e infinito eran conceptos terribles que, desafiando la lógica, amenazaban el orden establecido. El ideal de perfección, el

ser de Parménides, se representaba como una esfera, siempre igual a sí misma en el espacio y el tiempo, y sobre todo finita. Finito es, para los griegos, sinónimo de perfección, mientras que la propia idea de cero equivale a un anatema. ¿Cómo podría *la nada* ser *algo*? No es casualidad que el cero evocara el caos primordial: es el número que, multiplicado por cualquier otro número, en lugar de aumentar su valor lo aniquila, arrastrándolo a su propio abismo. Las cosas no mejoran cuando se intenta dividir por cero: también en este caso se produce un absurdo lógico, lo infinito, lo ilimitado, la grandeza informe y sin límites. Al igual que el vacío, también el infinito, inextricablemente vinculado a cero, resultaba igualmente horrible para los griegos. Los conceptos que desafiaban la lógica y perturbaban las mentes de los filósofos se consideraban inapropiados, incluso peligrosos: podían sembrar el pánico y provocar el desorden social.

He aquí la razón por la que la cultura occidental ha construido una especie de tabú sobre el cero que más tarde se extendió al vacío. De este prejuicio, que todavía condiciona nuestra manera de pensar, debemos liberarnos para comprender el mecanismo con el que un universo puede surgir del vacío.

El vacío del que hablamos no es un concepto filosófico, es un sistema *material* muy particular, en el que la materia y la energía son nulas. Es un estado de energía nula, pero es un sistema físico como todos los demás, que pueden ser investigado, medido, caracterizado.

Son innumerables los experimentos con el vacío que los físicos llevan años realizando. Se utilizan aparatos experimentales sofisticados para estudiar sus extrañas propiedades con el objetivo de comprender en detalle cómo influye el estado del vacío en algunas dimensiones características de las partículas elementales. No faltan incluso quienes creen posible descubrir en el vacío nuevos fenómenos que una vez dominados, puedan conducir a nuevas tecnologías.

Al igual que todos los sistemas físicos, también se aplica al vacío el principio de incertidumbre que regula el comportamiento de los sistemas a escala microscópica. La energía y el tiempo propios de cualquier sistema, incluido el estado de vacío, no pueden ser medidos al mismo tiempo con gran precisión a voluntad: el producto de sus incertidumbres no puede caer por debajo de cierto valor mínimo. Cuando decimos que el vacío tiene energía nula lo que queremos decir es que, al realizar un número muy alto de mediciones, se obtiene el cero como el valor promedio de los resultados; las medidas concretas dan valores fluctuantes, positivos o negativos, distintos de cero, que se distribuyen en una curva estadística con valor medio nulo. El principio de incertidumbre nos dice que cuanto menor sea el intervalo de tiempo en el que se realiza la medición, mayores serán las fluctuaciones de energía que resulten.

En realidad, esta característica no tiene nada que ver con la perturbación del sistema que se produce durante la medición, sino que es algo más profundo, vinculado al comportamiento de la materia a escala microscópica. El estado del vacío tiene energía rigurosamente nula si se observa en una escala de tiempo muy larga, infinita en teoría, pero en tiempos muy cortos esta fluctúa como todas las cosas, cruzando por todos sus posibles estados, incluidos aquellos, poco probables, caracterizados por una energía significativamente distinta de cero. En definitiva, el principio de incertidumbre permite la formación temporal en el vacío de microscópicas burbujas de energía, con la condición de que desaparezcan rápidamente. Cuanto menor sea la energía involucrada, más tiempo resistirá la burbuja anómala.

Al imaginarnos, pues, el comportamiento del vacío a escala microscópica, no debemos pensar en algo aburrido, estático, siempre igual a sí mismo. Al contrario, la sutil trama del vacío bulle con una infinidad de microscópicas fluctuaciones. Las que involucran más energía pronto volverán

sobre sus pasos pero, si la energía tomada en préstamo es nula, pueden durar para siempre.

La cuestión se complica ulteriormente si consideramos la presencia de materia y antimateria. Las fluctuaciones cuánticas del vacío pueden tomar la forma de una generación espontánea de pares de partículas/antipartículas. Por lo tanto, el vacío puede verse como un yacimiento inagotable de materia y antimateria. Puede aprovecharse la indeterminación debida al principio de incertidumbre y tomarse un electrón del vacío; si se vuelve a colocar inmediatamente en su lugar, nadie se da cuenta. Basta con ser lo suficientemente rápido y resulta posible. La operación equivale a tomar un electrón y un positrón juntos. Aquí debemos tener mucho cuidado, porque la regla de conservación de la carga no admite excepciones, es mucho más rígida que la de la conservación de la energía. No puedo extraer únicamente un electrón, ya que se alterarían las características del estado de vacío en su conjunto, que permanecería cargado positivamente. Tengo que sacar también un positrón siempre, el electrón positivo, de manera que el balance de carga del sistema quede equilibrado. En resumen, basta con extraer del vacío la misma cantidad de materia y antimateria y el vacío no protesta. Nos queda el problema de la energía de la pareja partícula/antipartícula: cuanto menor es la masa de la pareja, mayor es el tiempo de licencia que tienen a su disposición. Una vez que termine el recreo, el principio de incertidumbre hace sonar el timbre y los dos «escolares» se incorporan de nuevo a la disciplina en sus clases.

Este mecanismo no es un principio de física que rige en abstracto, sino un proceso material que se verifica cotidianamente en los aceleradores de partículas. Al golpear el vacío con la energía de los rayos en colisión se producen nuevas partículas, tanto más masivas cuanto más elevada sea la energía de la colisión. De esta forma se extraen del vacío grandes cantidades de partículas y para los propósitos más

dispares: desde isótopos radiactivos utilizados como trazadores en medicina nuclear hasta los bosones de Higgs producidos en el LHC.

El vacío es algo vivo, una sustancia dinámica e incesantemente mutable, henchida de potencialidades, preñada de opuestos. No es la nada, sino, por el contrario, un sistema desbordante de cantidades ilimitadas de materia y antimateria. En cierto modo, se parece de verdad al número cero, como pensaban los matemáticos indios. Lejos de ser un no-número, el cero contiene el conjunto infinito de números positivos y negativos, organizados en parejas simétricas, de signo opuesto, con suma cero. La analogía podría extenderse al silencio, entendido como superposición de todos los sonidos posibles que se borran entre sí cuando se suman en oposición de fase, o a la oscuridad que puede nacer de la interferencia destructiva de las ondas luminosas.

La hipótesis de que todo puede originarse a partir de una fluctuación cuántica del vacío surge de forma natural cuando se considera que, en nuestro universo, la energía negativa debida al campo gravitacional borra exactamente la energía positiva vinculada a la masa. Un universo con estas características puede nacer a causa de una simple fluctuación y las leyes de la mecánica cuántica nos dicen que puede durar para siempre. El universo de energía total nula constituye una importante variante de la teoría tradicional del Big Bang, que hace superflua la presencia de una singularidad inicial.

VACÍO Y CAOS

En cierta manera, la ciencia del siglo XXI hace que vuelva a estar de actualidad el relato de Hesíodo, esa *Teogonía* que encierra el origen de todo en un verso espléndido y fulminante: «Antes que todas las cosas, en un comienzo, fue el

Caos», afirmación que se ajusta perfectamente al relato científico, con la condición de que no empleemos la traducción más común y generalizada del caos, la que lo interpreta como desorden, conjunto indiferenciado. Es necesario más bien restaurar el significado originario de la palabra, que encuentra su asonancia en la palabra griega *chaino*, abrirse de par en par, *chasko*, quedarse con la boca abierta, o *chasma*, abismo. Así se convierte en una garganta negra abierta de par en par, un abismo sin fondo, el vórtice tenebroso, el enorme vacío capaz de engullir y contener cualquier cosa.

Este significado originario del caos fue el que se usó comúnmente durante mucho tiempo. La asociación del término con el concepto de desorden llegó mucho más tarde, primero por obra de Anaxágoras y luego de Platón. Con ellos, el caos se convierte en el contenedor de la materia informe que aguarda a ser ordenada por un principio superior. Será la Mente, o el Demiurgo, quien dé forma a ese material vil y basto y quien construya el *cosmos*, el sistema organizado y perfecto que lo regula y lo gobierna todo. Desde entonces esta idea ha perdurado durante milenios.

Pero el caos inicial, entendido como vacío, es todo menos desorden. No existe un sistema más rígidamente ordenado, regulado y simétrico que el vacío. Todo en él está estrictamente codificado, cada partícula material va de la mano de su correspondiente antipartícula, cada fluctuación observa de manera disciplinada las restricciones del principio de incertidumbre, todo se mueve siguiendo un ritmo acompasado y bien atemperado, una coreografía perfecta, sin improvisaciones ni virtuosismos.

Pero de alguna manera este mecanismo perfecto se atasca, algo extraño irrumpe de repente y ocupa el centro de la escena; luego, con un extraño, activa de repente el proceso que producirá a la vez un espacio-tiempo que se expande y masa y energía que lo curvan.

El orden extremo que lo gobierna todo se rompe en una fracción de segundo y la minúscula fluctuación cuántica se hincha de forma desmedida, impulsado por un proceso que llamamos *inflación cósmica*. Todavía se nos escapan muchos detalles del fenómeno, empezando por la identidad de la partícula material, el *inflatón*, que, extraído del vacío por un mecanismo puramente casual, dio comienzo a la maravillosa zarabanda que abordaremos en el próximo capítulo.