



GUIDO TONELLI

# GÉNESIS

El gran relato de la creación  
del universo



Lectulandia

Acaso tenían razón los griegos cuando afirmaban que al principio solo reinaba el caos. Así parecen confirmarlo muchas observaciones de la física moderna. Pero ¿qué ocurrió en los primeros instantes de vida del universo? Y hoy en día ¿es el universo ese sistema organizado y fiable que creemos ver o sigue estando dominado por el desorden primordial?

Para responder a estas cuestiones, una multitud de científicos exploran cada día los rincones más recónditos de la materia. ¿Podemos decir entonces que los grandes telescopios o los aceleradores de partículas, al igual que los relatos mitológicos en la Antigüedad, tratan de comprender la singularidad que dio origen al universo y reconstruir los mecanismos que caracterizan a muchas de las maravillas que nos rodean y que nos resultan familiares? Así nos lo demuestra Guido Tonelli en este extraordinario libro. Valiéndose de la mitología griega, el autor nos ofrece el gran relato de los orígenes que se deriva de la ciencia moderna y nos permite comprender la importancia de las cosmogonías para hallar nuestro lugar en el universo.

Guido Tonelli

# **Génesis: el gran relato de la creación del universo**

ePub r1.0

Un\_Tal\_Lucas 04-08-2024

Título original: *Genesis: il grande racconto delle origini*  
Guido Tonelli, 2019  
Traducción: Carlos Gumpert

Editor digital: Un\_Tal\_Lucas  
ePub base r2.1

*Al pequeño Jacopo*

Cuánta falta nos hace la poesía, desesperadamente.

AUTOR ANÓNIMO DE UNA PINTADA EN LA PARED DE UN CALLEJÓN EN EL  
CENTRO DE PALERMO, OCTUBRE DE 2018

Somos capaces de soportar cualquier clase de dolor si lo enmarcamos  
en una historia, o si contamos una historia acerca de él.

ISAK DINESEN

Echar raíces es quizás la necesidad más importante y menos  
reconocida del alma humana.

SIMONE WEIL

# Introducción

## El gran relato de los orígenes

Cuando, hace unos cuarenta mil años, la segunda oleada de *sapiens* llegó de África, los neandertales ya poblaban muchas zonas de Europa. Organizados en pequeños clanes, habitaban en hendiduras que hoy nos transmiten pruebas inequívocas de un complejo universo simbólico. Paredes pintadas con frescos de símbolos y dibujos de animales, cadáveres enterrados en posición fetal, huesos y grandes estalactitas colocadas en círculos rituales. Los testimonios de una civilización que tuvo, con toda probabilidad, un lenguaje sofisticado que nunca conoceremos, son innumerables.

Así pues, cabe imaginar que los relatos sobre los orígenes del mundo ya resonaban en esas cavernas, con los ancianos que transmitían a los más pequeños —potencia de la palabra y magia de la memoria— el eco de una historia antiquísima. Será necesario esperar miles de generaciones antes de que Hesíodo, o quien estuviera en su lugar, nos deje, con la *Teogonía*, un testimonio escrito de ese relato, tejiendo por primera vez un vínculo entre poesía y cosmología.

Ese relato de los orígenes continúa hasta hoy, gracias a la palabra de la ciencia. Las ecuaciones no tienen el poder evocador del lenguaje poético, pero los conceptos de la cosmología moderna —el universo que nace de una fluctuación del vacío o la inflación cósmica— aún nos dejan sin aliento.

Todo proviene de una pregunta, sencilla e ineluctable: «¿De dónde viene todo esto?».

Una pregunta que aún resuena, en todas las latitudes, entre individuos pertenecientes a las más diversas culturas, un rasgo común de civilizaciones aparentemente muy distantes. Se la plantean niños pequeños y directivos, científicos y chamanes, astronautas y los últimos representantes de esas pequeñas poblaciones de cazadores-recolectores que sobreviven, aisladas, en algunas zonas de Borneo o de la Amazonia.

Una pregunta tan primordial que algunos creen que puede incluso habernos sido transmitida por la especie que nos precedió.



## LOS MITOS FUNDACIONALES Y LA CIENCIA

Para los kuba del Congo quien creó el universo fue el gran Mbombo, señor de un mundo oscuro que vomitó el Sol, la Luna y las estrellas para liberarse de un terrible dolor de estómago; según los fulanis del Sahel, fue el héroe Doondari quien transformó en tierra, agua, hierro y fuego una enorme gota de leche; para los pigmeos de los bosques de África ecuatorial, todo nació de una enorme tortuga que puso sus huevos, nadando, en el agua primordial.

En el origen de la mayoría de los relatos mitológicos hay casi siempre algo indistinto, que nos amilana: el caos, las tinieblas, una extensión líquida y sin forma, una gran niebla, una tierra desolada. Hasta que un ser sobrenatural interviene para dar forma, para poner orden. Y entonces aparecen el gran reptil, el huevo primordial, el héroe o creador que separa el Cielo y la Tierra, el Sol y la Luna e insufla la vida a los animales y a los hombres.

La instauración del orden es un paso necesario para que se establezcan reglas y se sienten las bases de los ritmos que rigen la vida de las comunidades: los ciclos del día y de la noche y el alternarse de las estaciones. El desorden primordial trae a la memoria los miedos ancestrales, el terror de caer presa de las fuerzas desatadas de la naturaleza, ya sean animales salvajes o terremotos, sequías o inundaciones. Pero cuando la naturaleza queda plasmada para seguir las reglas dictadas por quien trajo el orden al mundo, entonces la frágil comunidad humana puede sobrevivir y reproducirse. El orden natural se refleja en el orden social, en el conjunto de reglas y tabúes que definen qué se puede hacer y qué está absolutamente prohibido. Si el grupo, la tribu, el pueblo al completo se comporta de acuerdo con las leyes establecidas por ese pacto primordial, este recinto de normas protegerá a la comunidad de la desintegración.

Del mito nacerán más tarde otras construcciones, que se convertirán en religión y filosofía, en arte y ciencia, disciplinas que se hibridarán y fertilizarán mutuamente, permitiendo el florecimiento de civilizaciones milenarias. Este entramado se rompe a partir del momento en el que las disciplinas científicas experimentan un desarrollo impetuoso, completamente desproporcionado con respecto a las demás actividades especulativas. Y entonces el ritmo somnoliento de sociedades inmutables durante siglos se quiebra de repente por una sucesión de descubrimientos que modifican profundamente la forma de vivir de pueblos enteros. De golpe, todo cambia, y sigue cambiando, a una velocidad aterradora.

Con el desarrollo de la ciencia, nace la modernidad, las sociedades se vuelven dinámicas y se transforman continuamente, los grupos sociales entran en ebullición, las clases dominantes experimentan cambios profundos,



equilibrios seculares de poder se ven distorsionados en el curso de pocas décadas, cuando no incluso de años.

Pero las transformaciones más profundas no atañen a la forma en la que nos comunicamos o producimos riqueza, a nuestra forma de cuidarnos o de viajar. Los cambios más radicales se producen una vez más en nuestra manera de examinar el mundo y de situarnos, en consecuencia, a nosotros mismos. El relato de los orígenes que se deriva de la ciencia moderna adquiere muy pronto una consistencia y una exhaustividad contra las que resulta difícil competir. Ninguna otra disciplina puede proporcionar explicaciones más convincentes, verificables y congruentes con la infinidad de observaciones generadas por los científicos.

A pesar de que el escenario en el que la humanidad se mueve vaya perdiendo progresivamente los rasgos mágicos y misteriosos que lo acompañaron durante milenios, la visión del mundo que va desarrollándose gradualmente es lo más increíble que podemos imaginar. La ciencia nos narra nuestros orígenes con una historia mucho más imaginativa y poderosa que cualquier relato mitológico. Porque, para construir esa historia, los científicos han explorado los rincones más ocultos y diminutos de la realidad, se han aventurado en la exploración de los mundos más remotos y han tenido que echar cuentas con estados de la materia tan diferentes respecto a los habituales que casi consiguen que sus mentes se tambaleen.

De ahí nacen los cambios de paradigma que definen una época y modifican de manera irreversible nuestras relaciones. Es la presión incesante de los descubrimientos científicos la que marca el ritmo de este movimiento subterráneo, como el poderoso impulso de un magma incandescente que deforma la corteza terrestre y la desgarrar a veces irremediabilmente.

La narración que la ciencia hace del origen del universo ya condiciona nuestras vidas, modifica en profundidad las bases sobre las que se construirán nuevos pactos sociales, abre escenarios sin precedentes de oportunidades y riesgos, determina el futuro de las nuevas generaciones.

Por esta razón, el relato de los orígenes que hoy plantea la ciencia debe ser conocido por todos, como ocurría en cada comunidad de la antigua Grecia, donde todos sabían cuáles eran los mitos fundacionales de su propia *polis*. Para hacerlo, sin embargo, hay que superar un gran obstáculo: debemos medirnos con la dificultad del lenguaje científico.

## UN COMPLEJO LENGUAJE

Todo proviene de un episodio aparentemente marginal, que sucedió hace poco más de cuatrocientos años, protagonizado por un profesor pisano de geometría y mecánica de la Universidad de Padua. Cuando a Galileo Galilei se le ocurre modificar el extraño tubo realizado por un fabricante de gafas holandés para convertirlo en un instrumento de observación de los cuerpos celestes, ni siquiera se imagina remotamente los problemas que se le vendrían encima por todo ello; y menos aún puede prever el desbarajuste que sus observaciones habrían de provocar en el mundo entero.

Lo que Galilei ve a través de ese sistema de lentes lo deja sin palabras: la Luna no es ese cuerpo celestial perfecto descrito en los textos de mayor autoridad, no está compuesto de materia incorruptible sino que tiene montañas, cráteres con bordes dentados y llanuras semejantes a las nuestras; el Sol tiene manchas y gira sobre sí mismo; la Vía Láctea es una enorme acumulación de estrellas; las «estrellitas» que rodean a Júpiter son satélites parecidos a la Luna que orbitan a su alrededor.

Cuando, en 1610, Galilei publique todo esto en su obra *Sidereus nuncius*, provoca, inconscientemente quizá, una avalancha que se llevará por delante un sistema de creencias y valores que había estado vigente durante más de mil años y que nadie se había atrevido a poner en discusión.

La modernidad nace con Galilei: el hombre se libera de toda tutela y permanece solitario, armado únicamente con su propio genio, frente a la grandeza del universo. El científico ya no busca la verdad en los libros, no inclina la cabeza frente al principio de autoridad, no se limita a repetir las fórmulas transmitidas por la tradición, sino que lo somete todo a la crítica más feroz. La ciencia se convierte en una búsqueda creativa de «verdades provisionales» a través de «sensatas experiencias» y «necesarias demostraciones».

La potencia del método científico estriba en el uso de conjeturas verificadas por medio de instrumentos que permiten observar, medir y catalogar los más variados fenómenos de la naturaleza. Son los resultados de los experimentos, lo que Galilei llama las *sensatas experiencias*, los que deciden si una conjetura funciona o ha de ser abandonada.

A partir de sus observaciones, no tardarán en encontrarse pruebas irrefutables para apoyar las teorías «enloquecidas» de Copérnico y Kepler, y la visión del mundo cambiará tan radicalmente que nada volverá a ser lo mismo. El arte, la ética, la religión, la filosofía, la política, todo, en definitiva, acabará patas arriba a causa de esta revolución conceptual que situará al hombre, con su razón, en el centro de todo. Los desbarajustes que el nuevo enfoque producirá, en un período de tiempo al fin y al cabo limitado, serán tan profundos que es difícil encontrar precedentes.

Lo verdaderamente revolucionaria de la ciencia galileana estriba en que no se arroga el derecho de poseer la verdad, sino busca incesantemente la

falsificación de sus predicciones; se entusiasma ante la idea de derribar de repente las certezas adquiridas hasta ese momento; se autocorrigue sobre la base de verificaciones experimentales; por último, para someter a prueba las conjeturas cada vez más complejas que se están elaborando, se lanza a explorar los rincones más recónditos de la materia y el universo.

De este enfoque paciente y consciente nacen nuevas concepciones que dan cuenta de fenómenos esquivos y aparentemente marginales. Así, mientras se construye una visión del mundo cada vez más completa y sofisticada, se acaba por dominar los fenómenos naturales más remotos hasta en sus más mínimos detalles y por desarrollar tecnologías cada vez más sofisticadas.

El precio que se paga por seguir este camino es el uso de instrumentos cada vez más complejos y de un lenguaje cada vez más apartado del sentido común. Tan pronto como nos alejamos del entorno en el que se desarrolla nuestra vida cotidiana, los instrumentos y el aparato conceptual que articulan nuestras actividades ordinarias resultan totalmente inadecuados. Para explorar las minúsculas dimensiones en las que se ocultan los secretos de la materia, o los inmensos espacios cósmicos que nos cuentan el origen del universo, necesitamos equipos muy especiales y años de preparación.

No es algo que deba sorprendernos. También las exploraciones más arriesgadas aquí en la Tierra requieren mucho esfuerzo e instrumentos especiales. Pensemos en las regatas extremas, en las escaladas del Himalaya o en las expediciones a las profundidades del océano. ¿Por qué habría de ser la exploración científica más sencilla?

Por esa razón, aquellos que realmente quieran apreciar la física tendrán que afanarse durante años, estudiar teoría de grupos y cálculo diferencial, dominar la relatividad y la mecánica cuántica, aprender la teoría de los campos. Asuntos peliagudos todos ellos, con un lenguaje y conceptos difíciles de manejar incluso para aquellos que los emplean desde hace años. Pero la barrera del lenguaje especializado, que impide a la mayoría penetrar en el corazón de la investigación científica moderna, puede ser eliminada fácilmente. Puede usarse el lenguaje ordinario para explicar los conceptos básicos y, sobre todo, para hacer accesible a cualquiera la nueva visión del mundo que la ciencia está produciendo.

## UN VIAJE PELIGROSO

Sin embargo, para comprender el origen de nuestro universo, debe uno estar dispuesto a emprender un viaje muy arriesgado. El peligro surge de la necesidad de llevar nuestra mente hacia ámbitos tan distantes de aquellos a los que estamos acostumbrados que nuestras categorías habituales se vuelven totalmente inútiles. De modo que nos vemos obligados a decir lo indecible, a representarnos lo inimaginable, midiéndonos con todas las limitaciones de una mente, la de nosotros los *sapiens sapiens*, que ha sido un instrumento poderosísimo para explorar y colonizar el planeta, pero que se revela completamente inadecuada para entender a fondo lo que sucede en lugares tan remotos. Al igual que los antiguos exploradores, no tenemos más remedio que dirigir la proa hacia el horizonte aceptando los riesgos y las incógnitas de la navegación en un océano desconocido.

En todo caso, en la investigación científica resulta muy importante también el regreso al puerto de origen. En eso, el investigador moderno se parece mucho a Ulises, que sueña constantemente, donde quiera que esté, con el momento de su desembarco en Ítaca. Volver a casa significa que, aunque la ruta no haya conducido a ninguna tierra nueva o hayamos sufrido un terrible naufragio, podremos contarles a los otros marineros las rutas infructuosas y los bajíos peligrosos que han de evitarse.

Porque la ciencia moderna es también una gran aventura colectiva. Tenemos teorías y cartas que nos guían, pero a menudo es la casualidad la que nos lleva a lugares completamente desconocidos; contamos con «barcos» en los que se vigila hasta el último detalle, pero basta con descuidar un mínimo aspecto y el desastre se abate contra nosotros. Nuestra tripulación es una comunidad variopinta y turbulenta de miles de mentes apasionadas, modernos exploradores pacientes y curiosos, capaces, como Ulises, de excogitar rápidamente nuevas estratagemas para superar cualquier imprevisto.

A pesar de los objetivos de nuestra investigación rayen en preguntas casi filosóficas (¿de qué está hecha la materia?, ¿cómo nace el universo?, ¿cuál será el fin de nuestro mundo?), el trabajo de los físicos experimentales es una de las actividades más concretas que puede uno imaginarse.

Un físico de partículas, uno de los diez mil investigadores que exploran en el mundo el comportamiento de las briznas más diminutas de la materia, no está sentado ante su escritorio haciendo cálculos, meditando acerca de teorías, imaginando partículas nuevas. Los modernos aparatos al servicio de la física de alta energía son tan altos como un edificio de cinco pisos, pesan tanto como un crucero y contienen decenas de millones de sensores. Para construir y hacer funcionar estos milagros de la tecnología, hacen falta miles de personas y un paranoico esfuerzo de atención hacia los detalles que puede durar décadas. Para construir nuevos instrumentos, más refinados que los precedentes, para botar «barcos» más ágiles y rápidos para nuestra navegación, pasamos años desarrollando prototipos, atormentándonos para

conseguir que funcionen y produciéndolos más tarde a gran escala. E incluso cuando esos detectores criados con tanta paciencia se instalan en el experimento y funcionan sosegadamente durante meses, vivimos siempre aterrorizados por la posibilidad de la catástrofe. Un detalle descuidado, un chip defectuoso, un conector frágil, un tubo de enfriamiento soldado apresuradamente pueden producir en cualquier momento daños irreparables para toda la empresa colectiva. La diferencia entre un rotundo éxito científico y el peor de los fracasos se oculta a menudo en un estúpido e insignificante detalle.

## LAS DOS SENDAS DE LA SABIDURÍA

¿Cómo se recopila la información experimental sobre el nacimiento del espacio-tiempo? ¿Cómo se las apañan los científicos para estudiar los primeros vagidos del universo recién nacido? Aquí entran en juego las dos sendas del conocimiento, completamente independientes y enteramente heterogéneas entre sí.

Por un lado, los físicos de las partículas que exploran lo infinitamente pequeño. El punto de partida es que la materia que nos rodea —la que forma rocas y planetas, flores y estrellas, todo en definitiva, incluido nosotros— tiene características muy especiales, propiedades que nos parecen consabidas pero que en realidad son muy particulares, vinculadas al hecho de que el universo es una estructura muy antigua y muy fría. Los datos más recientes nos dicen que «nuestra casa» se construyó hace casi catorce mil millones de años y que es un entorno realmente gélido, podría decirse que frío a niveles imposibles. A nosotros, aislados en el planeta Tierra, todo nos parece cálido y confortable, pero, tan pronto como se sale de la cáscara protectora de la atmósfera, el termómetro se desploma. Si se mide la temperatura de un punto cualquiera de los inmensos espacios vacíos que separan las estrellas o en el espacio intergaláctico, el termómetro marca apenas unos grados por encima del cero absoluto: menos 270 grados centígrados. La materia del universo actual, enrarecido, viejísimo y gélido, se comporta de una manera muy diferente a la del universo infantil, que era un objeto incandescente y de densidad enorme.

Para comprender lo que sucedió en esos primeros instantes de la vida, debemos esforzarnos por encontrar una manera de devolver pequeños fragmentos de materia actual a las altísimas temperaturas de esas condiciones

originarias. Debemos intentar realizar una suerte de viaje hacia atrás en el tiempo.

Eso es lo que se consigue con los aceleradores de partículas. Al hacer que choquen protones o electrones de alta energía, se explota la fórmula de Einstein: la energía es igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz. Cuanto más elevada sea la energía de la colisión, más elevada será la temperatura local que podrá obtenerse y mayor la masa de las partículas que podrán producirse y estudiarse. Para alcanzar las energías máximas se necesitan aparatos gigantescos, como el LHC, el gran acelerador del CERN que se extiende por 27 kilómetros bajo tierra en los alrededores de Ginebra.

De esta manera, calentando minúsculas porciones de espacio a temperaturas semejantes a las del universo primordial, resulta posible devolver a la vida partículas extintas: las partículas ultramasivas, que poblaban el objeto incandescente de los primeros instantes y que desaparecieron hace muchísimo tiempo. Gracias a los aceleradores, emergen por un momento del sarcófago helado en el que están como hibernadas y podemos estudiarlos en detalle. Fue así como descubrimos el bosón de Higgs. Devolviendo a la vida un puñado de esas partículas después de un sueño que duraba 13 800 millones de años. Como es obvio, los tan anhelados bosones se desintegraron de inmediato en partículas más ligeras, pero dejaron rastros característicos en nuestros detectores. Las imágenes de estas desintegraciones especiales se fueron acumulando y, cuando tuvimos la certeza de que la señal se distinguía perfectamente del fondo y que las demás posibles causas de error estaban bajo control, anunciamos al mundo el descubrimiento.

La exploración de lo infinitamente pequeño, la reconstrucción de las partículas extintas, el estudio de los estados exóticos de la materia que poblaron el universo primordial es una de las dos sendas para entender los primeros instantes de la vida del espacio-tiempo. La otra senda son los supertelecopios, enormes instrumentos que exploran lo infinitamente grande, que estudian estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias, tratando incluso de observar el universo al completo. También en este caso se explota la fórmula de Einstein que establece en  $c$  la velocidad de la luz, unos 300 000 kilómetros por segundo: una velocidad muy alta pero no infinita. De esta manera, cuando observamos un objeto muy distante, galaxias alejadas de nosotros a miles de millones de años luz, se nos aparecen no como son *ahora* —también resulta difícil definir lo que significa *ahora*—, sino como eran hace miles de millones de años, es decir, cuando emitieron esa luz que hasta ahora no nos había llegado.

Con los supertelecopios, mirando objetos muy grandes y muy lejanos, podemos observar «en vivo» todas las fases principales de la formación del universo y recopilar datos muy valiosos sobre nuestra historia. De esta

manera, observando las primeras tímidas señales emitidas por miles de nuevos astros que florecen en el corazón de enormes nebulosas gaseosas, entendemos cómo nacen las estrellas: percibimos que se densifican los gases y el polvo en los anillos de material que orbitan alrededor de algunas nuevas estrellas, indicio claro de sistemas protoplanetarios en formación. Así nació nuestro Sol y así se formaron los planetas que lo rodean, y es maravilloso poder verlo «en vivo».

Yendo más allá, asistimos a la formación de las primeras galaxias, objetos turbulentos que a veces emiten enormes cantidades de radiación en todas las longitudes de onda, signo inequívoco de nacimientos traumáticos. A través de los supertelescopios, en definitiva, podemos observar la maravilla del universo en su conjunto y medir algunas de sus propiedades con una precisión aterradora. La distribución local de la temperatura del universo es una especie de increíble memoria, que contiene rastros elocuentes de lo que sucedió en los primeros instantes de vida: minúsculas fluctuaciones de temperatura que nos hablan de nuestra historia más remota con un lenguaje que desde hace tiempo hemos aprendido a interpretar.

Pero lo más asombroso es que los dos caminos del conocimiento, basados en métodos tan diferentes y casi ajenos entre sí, gestionados por dos comunidades totalmente independientes, resultan coherentes del todo: los datos recogidos en el mundo de las distancias infinitesimales de las partículas elementales y en el de las enormes distancias cósmicas convergen, implacablemente, hacia el mismo relato de los orígenes.

## PERDED CUANTOS ENTRÁIS TODA ESPERANZA

El discurso científico requiere, por encima de todo, abandonar cualquier forma de prejuicio. Los exploradores de verdad no tienen miedo a lo imprevisto; todo lo contrario, no ven el momento de encontrarse ante fenómenos totalmente inesperados. Como los legendarios argonautas, que se embarcaron a la búsqueda del vellocino dorado, lo que les impulsa es más la curiosidad que la recompensa. No buscan la tranquilidad, al contrario, aman el riesgo.

Cuando se emprende un viaje hacia los orígenes del mundo, como el que estamos a punto de realizar, los conceptos que guían nuestra vida cotidiana, como la persistencia de las cosas, la tranquilidad que se desprende de la armonía que vemos a nuestro alrededor han de ser abandonados de inmediato



y para siempre. Ya no podremos referirnos al universo usando la palabra cosmos, como cuando todo nos parecía un sistema ordenado y regular y lo contraponíamos al caos, al desorden relegado a rincones remotos e insignificantes.

Estamos tan condicionados por nuestra vida cotidiana, por lo que vemos y experimentamos habitualmente en la delgada cáscara esférica que habitamos, que nos resulta natural imaginar que las leyes que regulan nuestra existencia son las mismas que rigen en cualquier otro rincón del universo. Hechizados por la regularidad con la que la noche sigue al día, la recurrencia de los ciclos lunares y las estaciones, por la persistencia de las estrellas que iluminan la bóveda celeste, suponemos que en todas partes rigen equilibrios similares. Pero no es así. Todo lo contrario.

Llevamos aquí unos escasos millones de años, viviendo existencias de duración infinitesimal en comparación con los ciclos de cualquier proceso cósmico de relieve; vivimos en un tibio planeta rocoso, rico en agua y rodeado y protegido por una cómoda atmósfera y por un benévolo campo magnético que, como mágicas mantas que absorben los rayos ultravioleta, nos protegen así de los efectos devastadores de los rayos cósmicos y de los enjambres de partículas. Nuestra estrella-madre, el Sol, es una estrella de tamaño mediano y habita en una región muy tranquila y bastante periférica de la galaxia que nos alberga. Todo el sistema solar orbita lentamente, por decirlo así, a veintiséis mil años luz de distancia del centro de la Vía Láctea. Una distancia de seguridad, porque allí acecha un monstruoso agujero negro, Sagitario-A\*, un objeto tan pesado como cuatro millones de masas solares, capaz de destruir miles de estrellas a su alrededor.

Si observamos además atentamente los fenómenos que afectan a cuerpos celestes aparentemente estacionarios y plácidos como las estrellas, nos topamos con objetos increíbles y descubrimos que inmensas cantidades de materia pueden comportarse de una manera muy excéntrica.

Es el caso de los púlsares, objetos tenebrosos y compactos, que concentran en un radio de unos 10 kilómetros la masa de uno o dos soles. Una infinidad de neutrones atrapados por la gravedad, que los aplasta, los comprime e intenta aplastarlos, mientras la estrella gira sobre sí mismo produciendo enormes campos magnéticos.

Por no hablar de los cuásares y los blazar, cuerpos ultramasivos que rugen en el centro de algunas galaxias. Agujeros negros con masas desproporcionadas, hasta miles de millones de veces la del Sol, capaces de engullir a las desafortunadas estrellas que acaban atrapadas por sus monstruosos campos gravitacionales. Una danza macabra que se desarrolla a lo largo de millones de años y que podemos observar desde la Tierra porque la materia que se precipita, en espiral, retorciéndose en el abismo, se

desintegra y acaba por emitir chorros altamente energéticos y rayos gamma que nuestros detectores son capaces de identificar.

Estos extraños cuerpos celestes, estrellas de neutrones y agujeros negros, se hallan en el origen de las inmensas catástrofes que parecen el pan de cada día de regiones enteras del «cosmos». Pero hoy pueden estudiarse con gran precisión, hasta el punto de que los hemos visto incluso entrar en colisión entre sí y sacudir el espacio-tiempo con ondas gravitacionales que han llegado hasta nosotros a años luz de distancia.

Pero para comprender cómo bajo la apariencia del *Cosmos* se oculta el *Caos*, no es necesario mirar tan lejos. Basta con observar de cerca la superficie del Sol. Lo que se nos aparece como una tranquila estrella que ilumina plácidamente nuestros días, visto de cerca, se convierte en un sistema complejo y caótico, compuesto por innumerables explosiones termonucleares, movimientos convectivos y oscilaciones periódicas de masas aterradoras y flujos de plasma proyectados a su alrededor por imponentes campos magnéticos. Dentro de nuestra estrella se está produciendo un choque de fuerzas titánicas, una batalla que perdura desde hace innumerables años, con un ganador anunciado: la gravedad. Y al cabo de unos cuantos miles de millones de años, cuando se agote el combustible nuclear, conseguirá por fin aplastar y hacer añicos las capas internas, llevando a nuestra estrella al colapso. El núcleo central se verá comprimido, mientras que las capas más exteriores empezarán a expandirse hasta alcanzar Mercurio, Venus y la Tierra, que se evaporarán al instante.

Esto se debe a que sistemas altamente caóticos, vistos desde lejos, pueden parecer ordenados y regulares. Y lo mismo ocurre en el otro extremo del campo de las observaciones, en el mundo de lo infinitamente pequeño.

Si observa muy de cerca la más reluciente y pulida de las superficies, nos topamos de inmediato con la danza caótica de los componentes elementales de la materia que fluctúan, oscilan, interactúan y cambian de naturaleza a un ritmo frenético. Quarks y gluones, que forman protones y neutrones, cambian de estado incesantemente, interactuando entre sí y con la infinidad de partículas virtuales que los rodean. La materia, en el plano microscópico, sigue implacablemente las leyes de la mecánica cuántica, dominada por el azar y el principio de incertidumbre. Nada se detiene, todo hierve en una extraordinaria variedad cambiante de estados y posibilidades.

Pero cuando miramos un gran número de estas partículas, cuando las estructuras se vuelven macroscópicas, los mecanismos que regulan su dinámica adquieren, de manera casi mágica, regularidad, persistencia, orden y equilibrio. La superposición de un número aterrador de fenómenos microscópicos aleatorios, que se desarrollan en todas las direcciones posibles, produce estados macroscópicos ordenados y persistentes.

Quizá sea conveniente utilizar un nuevo concepto para describir estos datos que parecen realmente estructurales: *caos cósmico* podría ser el oxímoron adecuado para relacionar las dos entidades que se persiguen y juegan al escondite en el universo. Es un juego que observamos cuando sondeamos las anfractuosidades más diminutas del mundo de las partículas elementales, pero que también se verifica cuando observamos lo que sucede en el corazón de las estrellas o de estructuras gigantescas, como las galaxias o los cúmulos de galaxias.

Para comprender el nacimiento del universo tendremos que abandonar, junto con muchos otros, el prejuicio del orden. Nos enfrentaremos a un viaje guiado tan solo por la imaginación, que tendrá que recurrir a conceptos tan osados como para reducir a la trivialidad la historia de ciencia ficción más imaginativa. Será un viaje que nos dará a conocer teorías que están cambiando para siempre nuestra visión del mundo, y al final, tal vez, descubramos que nos hemos convertido en algo diferente a lo que éramos al empezar.

Abrochémonos los cinturones, estamos a punto de despegar.

## 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 aún a 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 milenarista 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, completamente 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 irremediabilmente 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 inmenso 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 Saṃsāra, 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 gigantescas 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 *zephirum*, 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 nonúmero, 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.

## Día 1

### Un soplo imparable produce la primera maravilla

Todo tiene lugar en un instante. Un momento antes, esa microscópica estructura que hierve y tiembla, exactamente como las otras que la rodean, nos parece completamente insignificante.

Fijándonos un poco más, casi podemos ver una espuma finísima. La infinidad de pequeñas fluctuaciones que la compone trae a la memoria el líquido primordial de los relatos mitológicos: *aphros*, espuma en griego, que dio su nombre a Afrodita, nacida de la sangre y del esperma de Urano. Cronos, su hijo, le ha arrancado el sexo con una hoz para vengar a su madre Gea y lo ha arrojado al mar, haciendo que las plácidas aguas de Chipre hiervan a causa de un acontecimiento milagroso.

De la espuma cuántica nacerá algo más asombroso que la diosa del amor y de la belleza: todo un universo. Pero nadie puede imaginar todavía lo que está a punto de ocurrir. Solo han pasado  $10^{-35}$  segundos desde el momento en el que se formó, un intervalo de tiempo tan insignificante que ni siquiera podemos concebirlo. Todos nos esperamos que la minúscula burbuja, en la que se concentra nuestra atención, vuelva sobre sus pasos, disciplinada, como todas las demás. Y en cambio, la irrupción de un soplo imparable hace que crezca sin medida. De repente, el objeto infinitesimal, que fluctuaba con orden y sosiego, siguiendo el rígido ceremonial del principio de incertidumbre, se hincha de manera paroxística. La locura que lo posee afecta al vacío que lo rodea englobándolo inexorablemente, arrastrándolo hacia el mismo mecanismo. Todo ha sido tan rápido que, para ver exactamente lo que ha ocurrido, tendríamos que recurrir a la moviola. Pero ningún instrumento puede captar fotogramas a la velocidad necesaria para apreciar los detalles de una metamorfosis tan rápida.

Después, de repente, todo se calma y el extraño objeto que parece tener definitivamente vida propia sigue expandiéndose, si bien a un ritmo inmensamente reducido.



Hemos asistido al nacimiento de un universo, el nuestro. Termina el primer día, y ha nacido un universo que contiene ya todo lo que necesita para evolucionar durante los siguientes 13 800 millones de años, y solo han pasado  $10^{-32}$  segundos.

## UN EXTRAÑO CAMPO PRIMORDIAL

El universo, por lo tanto, comienza con una minúscula fluctuación del vacío que, mientras se va expandiendo, se llena con una extraña sustancia que hace que se hinche desmesuradamente.

El primero en proponer la teoría que trastornó la cosmología moderna fue Alan Guth, un joven que se había doctorado en el MIT y, a los treinta y dos años, buscaba empleo en alguna prestigiosa universidad estadounidense. Había sido invitado a celebrar un seminario en Cornell, una de las mejores, y fue allí donde presentó en 1979 su revolucionaria idea.

Como hemos visto, la teoría tradicional del Big Bang, aunque confirmada en líneas generales por las observaciones, dejaba demasiados problemas sin resolver.

El primer cadáver en el armario era el origen de la *singularidad* de la que había arrancado todo. No estaba claro a través de qué mecanismo pudo formarse, dado que se había excluido el Big Crunch. En los años ochenta se sabía que en el universo no había materia suficiente para superar la densidad crítica, esa que pudo haber desencadenado la gran implosión. Por lo tanto, se pensaba que la fuga de las galaxias iría desacelerándose lentamente a causa de la gravedad, sin dar lugar sin embargo al catastrófico colapso gravitacional. En resumen, lo que quedaba por explicar era cómo se había producido ese inmenso Bang.

En el objeto de dimensiones insignificantes que puede producirse mediante mecanismos puramente aleatorios, la fuerza que impulsa la danza es la gravedad, que es atractiva. Para expandirse y provocar el Big Bang hace falta una fortísima repulsión gravitacional, una *antigravedad*: algo parecido a la constante cosmológica que Einstein había introducido en su ecuación para estabilizar el universo, pero terriblemente más potente.

La materia común, la masa y la energía producen una energía negativa del vacío, de la que nace una presión positiva, es decir, que tiende a aplastarse, a contener el todo. Si entra en juego en cambio una sustancia completamente

nueva, que produce una energía positiva, la presión resultante es negativa, es decir, empuja hacia el exterior, tiende a provocar una expansión.

Otro misterio estaba relacionado con la increíble homogeneidad del universo observable. A nuestro alrededor hay por doquier galaxias de todas las formas, algunas plácidas y sosegadas, otras atormentadas por las actividades pirotécnicas de las *supernovas*, estrellas de neutrones y agujeros negros, pero, por maravilloso que sea, el paisaje cósmico se repite. En pocas palabras, cuando se observan regiones de grandes dimensiones, los objetos que pueblan los rincones más remotos del universo son muy parecidos.

El hecho recuerda esa sensación de desorientación que uno experimenta cuando, nada más aterrizar en aeropuertos de otros continentes, Kuala Lumpur o Sydney, por ejemplo, se ve caminando entre las mismas tiendas, que exhiben en sus escaparates prendas de vestir idénticas a las que hemos dejado al salir, en Roma o en París. Lo mismo ocurre con las maletas, teléfonos o máquinas fotográficas. Sin embargo, para este fenómeno hay una explicación obvia, que tiene que ver con las grandes cadenas de distribución del mundo globalizado; en cambio, hasta los años noventa, no se tenía la menor idea de los mecanismos subyacentes a la increíble homogeneidad en las observaciones astronómicas.

El misterio se complicaba aún más porque, a medida que se empleaban telescopios cada vez más potentes y resultaba posible indagar en regiones del universo inaccesibles hasta poco antes, se seguían viendo cosas de un parecido tremendo a todo lo que ya se conocía: galaxias semejantes a las ya vistas, cúmulos de galaxias que parecían gemelos de los que acababan de catalogarse.

Aún más asombrosa era la uniformidad que se medía en la temperatura de la radiación cósmica de fondo. Fuera cual fuera la dirección de los instrumentos, el resultado era siempre el mismo: 2,72 grados Kelvin, justo por encima del cero absoluto.

¿Cómo era posible que todas las zonas más remotas del universo, situadas a miles de millones de años luz de distancia entre sí, se hubieran puesto de acuerdo para hallarse exactamente a la misma temperatura en el instante en el que los científicos de un minúsculo planeta, en un anónimo sistema solar de una galaxia cualquiera, habían decidido echar un vistazo a lo que sucedía a su alrededor? Las distancias entre las regiones del universo en observación eran demasiado grandes para hipotetizar cualquier mecanismo que pudiera explicar el fenómeno.

Para encontrar una respuesta, Guth trató de imaginar qué podría suceder si, durante la expansión de la burbujita primordial, el minúsculo volumen hubiera sido ocupado por una energía de vacío positiva, parecida a la hipotetizada para la constante cosmológica. El candidato que le parecía más prometedor era el bosón de Higgs, una partícula de la que se hablaba mucho

en esos años para explicar el origen de las masas de las partículas elementales.

El Higgs es una partícula neutra y escalar, es decir, que tiene espín nulo: para entendernos, no gira sobre sí misma, a diferencia de lo que hacen todas las demás partículas elementales. En efecto, el campo de Higgs proporciona al vacío una energía positiva, pero si el volumen afectado se expandiera rápidamente, la densidad de la energía disminuiría con igual rapidez y no podría proporcionar impulso alguno. Para mantener la densidad constante en un volumen que aumenta rápidamente, la energía total también debería crecer a su vez, y esto violaría el principio de conservación de la energía.

En cambio, si durante la caída a pico hubiera un obstáculo, si, por alguna razón, su carrera hacia el potencial de punto cero, el del vacío, se detuviera por un momento, ¿qué ocurriría?

La respuesta que dio Guth a esta pregunta cambió, una vez más, la forma de ver el origen del universo.

## UNA EXPANSIÓN IRREFRENABLE

El mecanismo prevé un campo escalar que confiere al vacío una energía potencial positiva y, en el curso de su evolución, se bloquea durante una fracción de segundo en un estado de falso vacío, una hondonada del potencial de valor constante y distinto de cero.

Imaginémonos a un esquiador principiante que baja lentamente por una pista fácil, pero debe detenerse porque se topa con una meseta o una profunda cuneta. Momentáneamente, quedará atrapado en la hondonada, tendrá que impulsarse con los bastones para remontar el socavón y tal vez se caiga, y tendrá que empezar de nuevo antes de ganar la cresta; luego, superada la pequeña pendiente negativa, podrá reanudar el descenso y llegar rápidamente hasta la base del valle.

Si el campo escalar actúa como un esquiador, es decir, si se detiene, aunque no sea más que por un instante, en la cuneta, se desencadena un fenómeno de una violencia desproporcionada. A causa de la energía de vacío positiva, la burbujita recibe un impulso para aumentar su volumen. Con el campo bloqueado en el agujero, la densidad de energía permanece constante y, dado que el volumen está creciendo, aumenta la energía positiva almacenada en este y, por lo tanto, crece ulteriormente el impulso de dilatación.

En lugar de eliminarla, el movimiento de expansión inyecta energía en el espacio. Cuanto más crece la burbujita, más aumenta su impulso de expansión. Es la dinámica típica del crecimiento exponencial que, en este caso, tiene una explicación muy convincente. Gracias al exceso de energía, la burbujita extrae del vacío otras partículas escalares que llenan su volumen, y estas, a su vez, incrementan aún más el impulso.

Atrapado en el agujero, el campo llena el espacio con una sustancia que ejerce una enorme presión, no positiva como la de la materia y la energía, sino negativa como la energía del vacío que Einstein había introducido con su constante cosmológica.

Al gran científico le bastaba con una fuerza repulsiva relativamente débil para contrarrestar la fuerza de atracción proporcionada por la masa y la energía, y su energía del vacío era constante: el campo permanecía eternamente cristalizado, como Blancanieves durmiendo en su ataúd transparente.

El campo primordial sugerido por Guth tiene en cambio una fuerte dinámica; como en la fábula, el beso del príncipe interrumpe el sueño de la hermosa muchacha, pero lo hace solo durante un brevísimo instante y de él surge un hechizo increíble. Ese sigiloso despertar, que bloquea el campo en el falso vacío durante una fracción de segundo, produce una fuerza repulsiva fuertemente variable a lo largo del tiempo. Es monstruosa en el lapso en el que el campo está bloqueado y disminuye rápidamente tan pronto como sale del estado de falso vacío. La antigravedad de Alan Guth, que desencadena la expansión furibunda que se halla el origen del universo, es cien órdenes de magnitud mayor que la constante cosmológica. Es esta extraordinaria presión negativa lo que lo ha expandido todo a una velocidad monstruosa. He aquí donde viene el Bang.

En un minúsculo intervalo de tiempo sucede lo inimaginable. Ese objeto infinitesimal, miles de millones de veces más pequeño que un protón, experimenta un crecimiento exponencial que continúa a un ritmo vertiginoso que hace empalidecer el más frenético *crescendo* de Rossini. En un abrir y cerrar de ojos se convierte en un objeto macroscópico. Cuando sale de esta fase paroxística tiene dimensiones comparables a las de un balón de fútbol y contiene ya toda la materia y la energía que necesitará para evolucionar en los miles de millones de años que seguirán. En una fracción de tiempo ridícula, ese objeto insignificante ha crecido decenas de órdenes de magnitud, expandiéndose a una velocidad muy por encima de la de la luz. Los límites impuestos por la relatividad —que nada pueda moverse a una velocidad mayor que  $c$ — son válidos si algo se mueve *dentro* del espacio. Para el propio espacio, que se expande en el vacío o, para ser más precisos, transforma el vacío en espacio, estas restricciones no valen. No hay límites de velocidad para el universo niño que corre hacia su futuro.

Nuevas fluctuaciones cuánticas, semejantes a las que lo han generado, no tardarán en liberarlo del agujero en el que ha quedado bloqueado para llevarlo de vuelta a la justa vía, haciendo que se precipite hacia el estado de vacío verdadero, que alcanza en un instante. Solo han pasado  $10^{-32}$  segundos desde el tiempo cero. Pero todo ha cambiado.

Tan pronto como se concluye esta fase, mientras el campo permanece oscilando plácidamente en su agujero de mínimo de potencial, la energía acumulada en el objeto que ha sufrido una transformación tan explosiva se convierte en una enorme cantidad de materia/antimateria, parejas de partículas y sus correspondientes socios extraídos a espaldas del vacío interactúan entre sí y con los residuos del campo hasta que el conjunto alcanza una condición de equilibrio térmico.

El universo recién nacido contiene ahora toda la materia y energía actuales, si bien concentradas en un pequeño volumen; la densidad y la temperatura son altísimas y comienza una segunda fase de expansión que, aunque rápida, avanza a un ritmo decididamente menos frenético que el que ha predominado hasta un momento antes.

Alan Guth abrió el odre de piel que Eolo le había regalado a Ulises, y que contenía los vientos tormentosos que le habrían impedido regresar a Ítaca. Como los compañeros de Ulises, soltó la delgada cuerda plateada que lo mantenía cerrado: liberó el más poderoso de los soplos y se desencadenó el infierno.

Para dar un nombre a este nuevo fenómeno, Guth recurrirá al término *inflación cósmica*, derivado del latín *inflare*, hinchar, que ya se usaba en economía para describir un crecimiento vertiginoso en los precios.

La expresión más conocida está lastrada por ecos negativos, derivados de las experiencias traumáticas de los períodos de inflación galopante. Basta con pensar en las dramáticas historias de Alemania al acabar la Primera Guerra Mundial. El crecimiento de los precios arrastraba hacia nuevos aumentos en una espiral que nadie conseguía detener. En cuanto recibían su salario, los obreros corrían al mercado a comprar de todo, porque al día siguiente solo podían comprar la mitad de los productos y, al cabo de una semana, el dinero del salario se convertiría en papel mojado. Los vendedores, prisioneros del mismo mecanismo infernal, retocaban constantemente los precios de sus mercancías. En enero de 1923, se necesitaban 250 marcos para comprar un kilo de pan; en diciembre el precio se había elevado a la astronómica cifra de 400 000 millones de marcos. Son los absurdos del crecimiento exponencial.

## EL ÉXITO DE LA TEORÍA INFLACIONARIA

La hipótesis de que el universo haya podido pasar por una fase de inflación cósmica sigue siendo un tema de acaloradas discusiones entre los científicos, por más que una considerable mayoría la repute definitivamente como la explicación más convincente.

Una de las fortalezas que respaldan la teoría es que explica de manera natural el principio cosmológico, es decir, la extrema homogeneidad del universo a gran escala.

A primera vista, esta cuestión resulta bastante contradictoria. Basta con levantar la vista hacia el cielo para ver el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas y sacar la impresión de una variedad extrema en las estructuras que pueblan el cosmos. En realidad, se trata de uno de los numerosos prejuicios de los que somos rehenes por la única razón de tener un punto de vista muy limitado y una mirada que no nos permite cubrir grandes distancias.

Pero si usamos los instrumentos de exploración más modernos y ampliamos el horizonte para comprender el cosmos en su conjunto, estas diferencias «locales» se convierten en detalles insignificantes. Experimentos recientes han catalogado doscientas mil galaxias para llegar a la conclusión de que, en dimensiones de cientos de millones de años luz, las estructuras que encontramos son siempre muy parecidas, casi idénticas. En pocas palabras, nuestro universo, maravilloso y variado en sus recovecos locales, es bastante monótono, por no decir aburrido, cuando se navega a gran escala.

La homogeneidad se vuelve aún más persuasiva si nos fijamos en la distribución de su temperatura. Desde los años setenta, para estudiar en detalle la radiación cósmica de fondo, se programó el empleo de instrumentos en los satélites. Al liberarse de las perturbaciones debidas a la atmósfera terrestre, resultaba posible realizar mediciones mucho más precisas y, sobre todo, realizarlas en todas las longitudes de onda. Sin embargo, hicieron falta veinte años para obtener los primeros resultados que, pese a no llegar hasta principios de los años noventa, proporcionarán una clamorosa confirmación de las predicciones de la teoría de la inflación cósmica.

La homogeneidad e isotropía del universo son impresionantes. La distribución de temperatura reproduce perfectamente la prevista por la teoría: el universo se comporta como un gigantesco horno de microondas, cuyo efecto de calentamiento cesó en un pasado distante y se ha ido enfriando uniformemente desde entonces, a medida que se expandía. Regiones separadas por miles de millones de años luz tienen exactamente la misma temperatura, medida con una precisión absurda: 2,72548 grados por encima

del cero absoluto. La radiación es isotrópica, es decir, es la misma en cualquier dirección, mejor que una parte sobre cien mil.

¿Qué mecanismo ha consentido tal intercambio de energía entre áreas tan distantes hasta el punto de garantizar por doquier una temperatura tan uniforme?

No puede ser la luz porque, cuando apareció, el universo ya era enorme, de unos cien millones de años luz. Y las distancias eran demasiado grandes como para permitir que la luz corrigiera las eventuales diferencias de temperatura. En esa época las zonas más remotas del universo ya habían puesto de acuerdo para hallarse exactamente a la misma temperatura a millones de años luz de distancia.

Solo la inflación cósmica hace posible entender cómo pudo ocurrir algo parecido. Mecanismos alternativos, que han sido propuestos también, resultan poco plausibles.

Antes de la inflación, en la minúscula burbujita que luchaba con los vínculos de la mecánica cuántica, todas las partes estaban en contacto entre sí, como el punto de las *Cosmicómicas* de Calvino. Al poder intercambiar información, tenían todas las mismas propiedades, y la temperatura, en concreto, era la misma. La expansión inflacionaria propaga esta homogeneidad a escala cósmica y la convierte en propiedad general del universo. Al hacerlo, agiganta sin medida también las fluctuaciones cuánticas más pequeñas, presentes en el interior de la burbujita primordial. Mientras dilata el espacio, amplifica también las pequeñas perturbaciones, que seguirán creciendo hasta alcanzar la escala de los cúmulos de galaxias. Expandidas a nivel cósmico, esos minúsculos encrespamientos de energía se convertirán en una fina red que lo envuelve todo y sus nudos actuarán como semillas para producir nuevas agregaciones de la materia. Esas variaciones de densidad harán que los filamentos de la materia oscura se espesen y atraigan gas y polvo, alrededor de los cuales nacerán las primeras estrellas y se formarán las primeras galaxias.

A partir de esta relación incandescente, rígidamente determinada y al mismo tiempo caótica, entre las distancias siderales del cosmos y el mundo infinitesimal de la mecánica cuántica, nacieron las estructuras materiales que han originado la dinámica y la belleza. Un mundo sin fluctuaciones no habría producido estrellas, galaxias, planetas; en un universo perfecto no habría viento de primavera ni la sonrisa de las chicas jóvenes. Todos nosotros descendemos de esta anomalía que llamamos *inflación* y que ha llevado a la espuma cuántica a adquirir dimensiones cósmicas.

Cuando los instrumentos más sofisticados instalados en los satélites demuestren que la distribución de isotropías es exactamente igual a la prevista por los modelos inflacionarios, incluso los más detractores más convencidos de la nueva teoría tendrán que admitir su poder predictivo.

Sin embargo, aún quedaba una cuestión de enorme discrepancia, que amenazaba con abrir una nueva crisis y derrumbarlo todo como un castillo de naipes. La inflación, en efecto, exigía necesariamente un universo de curvatura local nulo, es decir, plano. La curvatura espacio-temporal depende de la densidad, es decir, de su contenido de materia y energía. Para una densidad exactamente igual a la densidad crítica, el universo es plano y su curvatura local nula, como la de una superficie plana; lo que significa que la expansión prosigue indefinidamente. Para densidades superiores, el universo se cierra, su curvatura local es tan positiva como la de una esfera, la expansión disminuye y el Big Bang se invierte en el Big Crunch. Para densidades inferiores, la curvatura local es negativa, como la de una silla de montar de caballo, y también en este caso la expansión continúa hasta el infinito.

Si la inflación realmente se produjo, al universo no le queda más remedio que ser plano; las dimensiones iniciales de la microscópica burbujita habrían sido *planchadas y aplanadas* por la furibunda expansión de los primeros momentos y solo un universo primordial con una curvatura exactamente nula podría permanecer plano al cabo de miles de millones de años. Cualquier desviación inicial de esta condición habría sido amplificadas sin medida por la expansión posterior.

En otras palabras, una de las verificaciones más importantes de la teoría de la inflación podía obtenerse midiendo la curvatura local del universo o su densidad de materia y energía. Y aquí surgieron los problemas.

La curvatura local del espacio-tiempo puede extraerse una vez más de la radiación fósil de fondo. Es suficiente con medir el diámetro angular de las minúsculas variaciones de homogeneidad de temperatura, diferencias de unos pocos cientos de milésimas de grado entre una región y otra del cielo, hijas de las fluctuaciones estadísticas primordiales. Y los datos experimentales reproducían de manera impecable las previsiones de la inflación, porque nos decían que el universo es plano. Pero este resultado contrastaba netamente con las medidas de densidad de energía del universo que, hasta principios de los noventa, parecían indicar que el universo estaba abierto, es decir, que tenía una curvatura de silla de montar.

Esta discrepancia se mantuvo durante varios años como un punto doloroso en la teoría inflacionaria, desencadenando las objeciones de muchos de sus detractores. La inflación debía ser abandonada porque implicaba necesariamente que la densidad del universo debía ser igual a la crítica, mientras que las observaciones más precisas hasta mediados de los años noventa indicaron que ni siquiera llegaba a un tercio.

Con el descubrimiento de la energía oscura en 1998 este argumento quedó en entredicho. Tras observar que la velocidad de fuga de las galaxias más lejanas crecía con el tiempo, tuvimos que aceptar la idea de una nueva forma



de energía que impregnaba todo el espacio y contribuía a la masa total del universo en dos tercios del total. Con ello, el valor de la densidad alcanzaba el de la densidad crítica, se comprendía por qué la geometría del universo era plana y todo ello se convertía en una ulterior confirmación de la validez de la hipótesis inflacionaria.

## EN BUSCA DE LA PISTOLA HUMEANTE

A pesar del éxito de la teoría y de las numerosas confirmaciones experimentales, todavía hay un grupo pequeño pero aguerrido de críticos que se oponen con vigor a la hipótesis de la inflación.

En realidad, no es más que una dinámica normal, típica del método científico: criticarlo todo, dudar siempre, buscar los puntos débiles, valorar hipótesis alternativas forma parte de la deontología profesional de los científicos.

Con todo, es necesario admitir que aún queda un punto crítico que es fácil que los escépticos señalen con el dedo. A fin de cuentas, la inflación proviene de un campo escalar que emerge del vacío con su potencial inestable y desencadena la expansión, pero nadie ha encontrado hasta ahora rastros inequívocos del *inflatón*, la partícula asociada con este campo. El día que esto ocurra, nadie tendrá ya dudas, sería como encontrar «la pistola humeante» de la inflación. Pero esto aún no ha ocurrido y la búsqueda del inflatón prosigue.

La idea inicial de la que partió Alan Guth era que el que lo había desencadenado todo podía ser el bosón de Higgs. Esta misteriosa partícula, en aquel momento, era solo una hipótesis, un elemento cardinal de una teoría que bien podía resultar una conjetura arbitraria, como muchas otras. Además, esta no preveía valores precisos para la masa del bosón ni otras características relacionadas con ella. Con el bosón de Higgs representando el papel del inflatón, resultaba fácil explicar cómo podía comenzar la inflación, pero no era nada fácil en absoluto encontrar un mecanismo para detenerla.

En realidad, el propio Guth y otros científicos no tardaron en desarrollar modelos en los que campos escalares diferentes podían activar el mismo mecanismo. El papel del potencial bloqueado, hipotetizado para el bosón de Higgs como un estado de falso vacío, podía ser representado por un potencial débilmente variable, que disminuyera lentamente con el tiempo, mientras la burbujita primordial se expandía. Así se desarrollaron familias enteras de

modelos inflacionarios diferentes, cuyas características dependían esencialmente de las hipótesis que se elaboraban acerca del inflatón.

Algunos llegaron incluso a teorizar modelos de *inflación eterna*. Partiendo de la idea de que las fluctuaciones cuánticas del campo escalar podían desencadenar el paroxismo inflacionario a partir de una pequeña porción del mismo, mientras de ahí nacía un universo que empezaba su evolución, del resto del material, que había sobrevivido en los márgenes del mismo, podían desarrollarse otros en un mecanismo de inflación eterna que produciría esa infinidad de universos hipotetizados en las modernas teorías del *multiverso*.

Solo con el descubrimiento del inflatón será posible, por un lado, obtener una confirmación irrefutable de la exactitud de la teoría y, por otro, discernir los distintos modelos propuestos.

Cuando, en 2012, después de una cacería que duró casi cincuenta años, se descubrió el bosón de Higgs en el CERN y se midieron todas sus características, incluida la masa, se reabrió de inmediato el debate sobre su posible papel en la fase inflacionaria.

El recién llegado es la primera partícula escalar fundamental y algunos cosmólogos siguen pensando que se trata precisamente del inflatón. Otros discrepan de estas valoraciones y lo consideran excesivamente pesado. Por lo tanto, se busca una partícula semejante pero más ligera que pueda aparecer en algunas desintegraciones raras producidas por las colisiones del acelerador, o algún otro escalar, su pariente cercano, con el que pueda compartir el esfuerzo primordial de dar lugar a un universo entero.

Las opiniones sobre este punto son contradictorias y la solución solo puede provenir de una nueva campaña de estudios experimentales.

En los próximos años se esperan mediciones mucho más precisas del fondo de radiación cósmica, capaces de reconstruir con claridad las huellas evanescentes dejadas por la inflación. Con el reciente descubrimiento de las ondas gravitacionales se espera incluso elevar la sensibilidad de los nuevos instrumentos a un nivel tal que nos permita identificar las ondas gravitacionales fósiles, esas fluctuaciones imperceptibles del espacio-tiempo que pueden contarnos en vivo lo que sucedió durante la fase de crecimiento inflacionario.

Y eso siempre que no llegue la sorpresa del descubrimiento, en los experimentos que estamos realizando con el acelerador de partículas, de un nuevo escalar con todas las características adecuadas para corresponder con el retrato robot del fugitivo número uno que andamos buscando.

## EN LA ERA MÍTICA DE LA GRAN UNIFICACIÓN

La inflación no es el primer acto que tiene lugar en el escenario, por más que sea decididamente uno de los más espectaculares. No estamos en condiciones de describir lo que sucedió en los brevísimos momentos anteriores, pero sabemos que ocurrieron cosas importantes. Un muro insuperable nos impide comprenderlo. Solo podemos aventurar conjeturas, al igual que los prisioneros de la caverna de Platón.

Encadenados desde la infancia, con las piernas y el cuello bloqueados por sujeciones, sin ninguna experiencia del mundo externo, no pueden percibir directamente lo que sucede fuera de la caverna, más allá del muro. Por eso construyen su visión del mundo a partir de las sombras que aparecen en la pared. Algo así hacemos los científicos para tratar de adivinar lo que pudo haber sucedido antes de la inflación. Solo podemos ver sombras e imaginar.

Realizamos mediciones precisas de la escala energética que podemos explorar directamente, a través de los aceleradores de partículas o estudiando los fenómenos más energéticos que se producen en el cosmos. Luego extrapolamos estos resultados a la escala de la energía que no podemos estudiar directamente y desarrollamos conjeturas congruentes con todas las observaciones recogidas.

Estamos hablando de la fase inicial de la vida del universo, cuya duración, increíblemente corta, es la del tiempo de Planck,  $10^{-43}$  segundos, que corresponde a un tamaño del universo de  $10^{-33}$  centímetros. Con estas proporciones, el espacio no es liso ni inerte, sino que bulle de partículas virtuales que aparecen y desaparecen a un ritmo infernal. Nace de todo ello una efervescencia cuántica desenfrenada, un espacio tumultuoso y caótico que se llena de asperezas y de falta de uniformidad. En estas dimensiones, la espuma cuántica hierve espasmódicamente y fluctúa sin cesar. La curvatura y la topología de esta región solo pueden describirse en términos probabilísticos.

Ninguna de las teorías físicas actuales es capaz de describir correctamente lo que sucedió en la era de Planck y de las distintas hipótesis surgen diferentes predicciones. Más allá del muro que nos imposibilita la visión, se ocultan los secretos de la gravedad cuántica, la quimera que generaciones de físicos llevan décadas persiguiendo. Tal vez la insignificante región bulla de pequeñas *cadena*s oscilantes que evolucionan en 10 o 26 dimensiones, o tal vez el espacio tenga una estructura discreta organizada en *bucles* infinitesimales, o quizá los trucos que la naturaleza ha desarrollado para cuantizar la gravedad exceden el esfuerzo imaginativo que los humanos hemos sacado a relucir hasta hoy.

Nadie ha logrado hasta ahora echar un vistazo a esos momentos tan cercanos al instante inicial o explorar distancias tan diminutas. Tan solo pueden proponerse hipótesis razonables sobre los fenómenos dominantes en ese intervalo de tiempo: creemos que se trata de la era de la Gran Unificación. Las fuerzas fundamentales están unificadas en un solo campo: una única superfuerza primordial gobierna la insignificante porción de espuma que se convertirá en nuestro universo.

El mundo entero en el que vivimos se mantiene unido gracias a fuerzas que podemos clasificar en orden decreciente de intensidad. La primera de la lista es la interacción nuclear fuerte, la que mantiene unidos los quarks para formar protones y neutrones y forma con ellos los núcleos de los diversos elementos. De ahí proviene la energía que se desprende de los artefactos nucleares o la que mantiene encendidas las estrellas. La fuerza débil es más tímida y decididamente menos llamativa. Actúa solo en distancias subnucleares y rara vez ocupa el centro de la escena. Aparece en algunas desintegraciones radiactivas, aparentemente insignificantes, pero vitales en realidad para la dinámica del universo. La fuerza electromagnética mantiene unidos átomos y moléculas y regula con sus propias leyes la propagación de la luz. La gravedad es de lejos la más débil, aunque sea mucho más popular que las demás. Actúa siempre que se presenta una masa o energía e impregna todo el cosmos, regulando el movimiento de los más pequeños asteroides del sistema solar hasta los cúmulos de galaxias más gigantescos.

Hoy, en este universo viejo y frío que habitamos, estas fuerzas actúan por separado y tienen una intensidad y un radio de acción distintos. Pero lo que hemos verificado, en innumerables experimentos, es que todo esto varía con la densidad de energía. A medida que crece, parece como si se instaurara un principio de justicia e igualdad: «Los fuertes serán menos fuertes, y los débiles serán menos débiles». La fuerza fuerte disminuye su intensidad y lo mismo sucede con la fuerza electromagnética. Por el contrario, la intensidad de la interacción débil crece hasta el extremo de que puede predecirse dónde convergerán las tres curvas: la energía con la que se fusionarán en una sola fuerza.

En todo esto, la gravedad permanece un poco apartada: es tan débil que no podemos medir las variaciones de su intensidad en las escalas de energía exploradas hasta ahora, pero resulta natural permitir que entre en juego.

Llamamos *era de Planck* a este período primordial en la evolución del universo, dominado por una superfuerza que unifica las cuatro fuerzas fundamentales. Es como imaginar una especie de edad de oro, la alianza sagrada entre hombres y dioses, que viven juntos compartiendo amores y celos.

En el diminuto y ardiente universo de los orígenes rigen simetrías elegantes y perfectas que se rompen, una tras otra, a medida que todo se

enfriá.

Una primera dramática separación tiene lugar precisamente en la era de Planck, cuando la gravedad se disocia del resto de las fuerzas. Inmediatamente después, otra transición de fase separa la fuerza fuerte de la electrodébil.

Nuestra historia ya ha dado comienzo antes de que la inflación produzca la gran explosión: en una minúscula porción de vacío, el campo de una superfuerza recorre, gradualmente, transformaciones de fase, rupturas de simetría que separan las diversas interacciones entre sí. Las sucesivas cristalizaciones del campo primordial poblarán nuestro mundo con las cuatro interacciones fundamentales y todo cambiará, de repente.

A diferencia de lo que sucedió con las dos primeras rupturas de la simetría, para la siguiente, que separa definitivamente la fuerza débil de la electromagnética, hemos recopilado datos inequívocos que nos permiten contar una historia detallada. Hemos podido estudiarla en el laboratorio, reproduciéndose en el CERN, con el descubrimiento del bosón de Higgs, el protagonista principal de lo que sucedió  $10^{-11}$  segundos después del Big Bang. De eso hablaremos en el próximo capítulo.

## Día 2

### El delicado toque de un bosón lo cambia todo, para siempre

El universo incandescente, recién salido de la fase inflacionaria, contiene ya toda la materia y la energía que necesita, pero si pudiéramos observar su interior, no reconoceríamos nada familiar. Veríamos una especie de gas informe de minúsculas partículas, indistinguibles entre sí: todas carentes de masa y volando a la velocidad de la luz. El conjunto se presenta como un objeto perfecto, homogéneo e isotrópico, igual a sí mismo en cada punto y bajo todos los ángulos. Ningún punto de agregación, ninguna heterogeneidad.

Si no fuera porque se expande a una velocidad enorme, podría confundirse con la representación ideal de ser de Parménides: idéntico a sí mismo en todas partes, simétrico en cada rotación, totalmente libre de defectos e imperfecciones. Es el reino de la uniformidad y de la perfección, gobernado por la simetría, que es a la vez simplicidad y elegancia. Si algo sorprendente no hubiera llegado para perturbar esa armonía que parecía inmutable, de ese objeto perfecto no habría nacido nada. Hubiera sido un universo estéril, un enorme desperdicio de energía, desprovisto de la luz de la luna y del aroma de las flores, triste, anónimo, desolado.

Estamos cerca del momento en el que tendrá lugar la última, y tal vez la más importante, de las transformaciones que decretarán su destino.

Una vez digerida la euforia de la inflación, su expansión prosigue, impulsada por la energía que hierve en su interior. Al crecer de tamaño, el universo se enfría, y al hacerlo desencadena reacciones que cambian profundamente su dinámica.

Hemos alcanzado un centésimo de milmillonésimo de segundo después del Big Bang y a partir de este momento las cosas serán mucho más claras. Desde que descubrimos el bosón de Higgs, y medimos su masa, esta parte de la historia tiene pocos secretos.

El universo recién nacido ya es imponente. Ha alcanzado el respetable tamaño de 1000 millones de kilómetros y de repente, cuando la temperatura

cae por debajo de cierto umbral, los bosones de Higgs, que hasta hace un momento correteaban con libertad, se congelan y se cristalizan. A esas temperaturas, gélidas para ellos, no pueden sobrevivir y se ocultan en el cómodo sepulcro del vacío. Habrá que tener mucha paciencia para volver a verlos de paseo. Pasarán 13 800 millones de años antes de que alguien consiga producir en el planeta Tierra colisiones de energía tan altas como para traerlos de vuelta a la vida, aunque solo sea durante una fracción de segundo; tiempo suficiente, sin embargo, para que dejen trazas inequívocas de su presencia.

El campo asociado con ellos adquiere un valor específico, que cambia radicalmente las propiedades del vacío. Muchas partículas elementales, al cruzarlo, experimentan una fuerte interacción y su velocidad disminuye, es decir, adquieren una masa; otras, que viajan sin ser molestadas, permanecen sin ella y pueden continuar moviéndose a la velocidad de la luz.

La simetría perfecta que había caracterizado el universo primordial se rompe con el campo de Higgs y la interacción débil se separa definitivamente de la electromagnética. Algunas partículas se vuelven tan pesadas como para resultar inestables y desaparecerán inmediatamente del universo en enfriamiento rápido. Otras adquieren definitivamente una masa, pero permanecen ligeras, y esta característica suya será fundamental para llegar rápidamente a una organización de la materia muy especial.

El recién llegado, el campo de Higgs, que actúa con delicadeza, ha construido la multiplicidad siguiendo una regla simple y clara. Las partículas elementales, que permanecen enredadas en su campo, difieren entre sí según la intensidad de la interacción, y al hacerlo acaban adquiriendo masas irremediabilmente diferentes. Su sutil acción se asemeja a la del demiurgo en el *Timeo* de Platón, el artesano ordenador que, con la mediación del número, vuelve dinámica y vital la materia informe e innata que le precedía.

Todo nacerá de este toque delicado que cambia las cosas para siempre. Pero aún es temprano, no debemos apresurarnos. Acaba de terminar el segundo día y solo han pasado  $10^{-11}$  segundos.

## EL HECHIZO DE NARCISO

Cuando uno ve el lienzo por primera vez, es imposible no quedar hechizado ante al círculo perfecto que contiene las dos figuras: la del muchacho con ropas preciosas que se inclina sobre el agua y su imagen reflejada, que admira

extasiado. La solución elegida por Caravaggio para contar el mito de Narciso es sencillamente genial. Se trata de una de las metamorfosis más famosas de Ovidio, la del hermosísimo joven que, por haber rechazado a la ninfa Eco, es sentenciada a enamorarse locamente de la única persona que nunca podría tener: él mismo. De este modo, el joven extiende la mano izquierda hacia su propia imagen reflejada por el agua, esperando poder tocar al ser amado, pero todo lo que consigue es mojarse los dedos. El círculo que los rodea contribuye a exaltar la perfecta simetría de reflexión que vincula las dos figuras.

El célebre cuadro del Palazzo Barberini de Roma es una de las numerosas obras maestras del arte que han recurrido a la simetría como clave para contar la belleza.

El significado literal de la palabra griega de la que se deriva, *con medidas apropiadas*, evoca los conceptos de proporción y armonía que tanto espacio tenían en el imaginario estético y filosófico de la Antigüedad. Para los griegos y los romanos, para ser hermosa, una obra tenía necesariamente que ser simétrica, con elementos y volúmenes que guardaran relación matemática entre sí.

La simetría central, la que define la distribución regular de los segmentos de una naranja o de las puntas de una estrella de mar, es ampliamente utilizada en el mundo clásico, basta con pensar en la cúpula del Panteón o el Templo de Hércules Víctor en la piazza Bocca della Verità en Roma.

El significado moderno de simetría que, si bien vinculado a la tradición, implica repeticiones regulares de formas y figuras, transformaciones bajo traslaciones y rotaciones, es una adquisición más reciente. De esta nueva conciencia nacieron auténticas joyas del Renacimiento, como la cúpula de San Pedro de Miguel Ángel o esa maravillosa obra de Bramante, el templete de San Pietro in Montorio.

La noción moderna de simetría ha hecho posible su formalización matemática, que ha encontrado muchas aplicaciones en campo científico. Para la física, en particular, la simetría no es solo una propiedad que implica regularidad y elegancia en las relaciones. Es una auténtica herramienta de investigación que ha permitido obtener nuevas leyes de la naturaleza. Todo esto se lo debemos a Emmy Noether, tal vez la mejor matemática de la historia.

La joven estudiosa alemana tuvo que pasar un calvario durante años antes de poder dar clases en la universidad; era una empleada no remunerada y soportada a duras penas cuando, en 1918, llegó a formular la relación que cambiaría el rostro de la física contemporánea. El teorema de Noether establece que a cada simetría continua de las leyes de la física le corresponde una *ley de conservación*, es decir, una cantidad física medible que permanece sin cambios.



Los ejemplos más comunes son las simetrías que dan origen a los principios de conservación de la mecánica clásica. Si un sistema sigue leyes de movimiento que no cambian cuando se desplaza el sistema de referencia —simetría de traslación espacial—, entonces se conserva la cantidad de movimiento; si las mismas son invariables debido a la traslación del eje del tiempo, se conserva la energía; si lo son a causa de la rotación, se conserva el momento angular y así sucesivamente.

En la física contemporánea, esta relación entre simetrías, transformaciones y dimensiones físicas que se conservan estará generalizada. La invariancia de algunas propiedades físicas en un sistema sometido a transformaciones nos permitirá descubrir y formalizar las relaciones que sentarán las bases de una nueva concepción de la materia. Así nacerán los principios de conservación de grandezas físicas de extraños nombres, que resultarán decisivos para describir los componentes más diminutos de la materia: *la extrañeza, el isospín, el número leptónico* y otros muchos.

El concepto de simetría se hará más general, de modo que se hablará de *simetrías continuas o discretas, locales o globales, exactas o aproximadas*: todas ellas herramientas fundamentales para comprender la dinámica de las partículas elementales y sus campos. Sin la contribución de Emmy Noether, todo esto no habría sido posible.

La culminación de este esfuerzo será el desarrollo del Modelo Estándar de las partículas elementales, una construcción monumental que contiene la descripción más precisa de la materia de la que disponemos actualmente.

La teoría de más éxito de la física contemporánea explica la materia a través de un número muy limitado de componentes: seis *quarks* y seis *leptones*, organizados cada uno en tres familias diferentes. Las doce partículas de materia se combinan juntas o interactúan entre ellas, intercambiándose otras partículas que transmiten las fuerzas: el *fotón* que transporta la interacción electromagnética; los *gluones* que transmiten la interacción *fuerte*; los *bosones vectoriales W y Z* que permiten propagar la interacción débil. Las partículas de materia, los leptones y los quarks tienen un espín semientero ( $1/2$ ) y constituyen la familia de los *fermiones*, mientras que las partículas que transportan las interacciones tienen un espín entero (1) y forman la familia de los *bosones*. Con esta limitada lista de ingredientes se pueden construir todas las formas conocidas de materia, tanto las estables que pueblan nuestra vida diaria, como las exóticas y efímeras que se producen en los aceleradores o en los procesos altamente energéticos en el corazón de las estrellas o durante las catástrofes cósmicas.

La teoría alcanzó de forma inmediata un éxito rotundo gracias en su enorme poder predictivo. Desde su formulación, en la década de los sesenta, ha planteado hipótesis de nuevas partículas que se han ido descubriendo con regularidad y ha permitido calcular con gran precisión nuevas dimensiones

que, una vez medidas, resultaban conformes a los pronósticos, a veces incluso hasta la décima cifra decimal.

El arquitrabe del Modelo Estándar es la unificación de la interacción electromagnética con la débil, que se convierten así en dos manifestaciones diferentes de una fuerza única, la interacción *electrodébil*.

Todo nace, una vez más, de una simetría. El primero que la entrevió fue Enrico Fermi cuando, con poco más de treinta años, intuyó que detrás de un fenómeno aparentemente marginal —radioisótopos que decaían emitiendo electrones— se escondía una nueva fuerza fundamental. Fermi hipotetizó una fuerte analogía formal entre la nueva interacción y el electromagnetismo y la empleó para elaborar una descripción de la nueva fuerza y calcular su constante de emparejamiento.

Durante muchos años, la nueva fuerza se llamará *interacción de Fermi*. Solo cambiará su nombre a interacción débil con el tiempo, para recordar el pequeño valor de esa constante,  $G$ , que determina la intensidad de la fuerza y que, en honor a su descubridor, todavía se llama *constante de Fermi*.

La innovadora idea del joven científico allanó el camino para esa unificación de la fuerza electromagnética y la fuerza débil que, treinta años después, constituiría la base del Modelo Estándar de las interacciones fundamentales.

En 1865, James Clerk Maxwell publicó las ecuaciones que sentaron las bases de la teoría unificada de los fenómenos eléctricos y magnéticos: nacía así el electromagnetismo. A la distancia de un siglo se repite la historia. Pasada la mitad de los años sesenta, serán Steven Weinberg, Sheldon Glashow y Abdus Salam, con la decisiva contribución de Gerardus 't Hooft, quienes formalizarán la nueva teoría. Electromagnetismo y fuerza débil son dos manifestaciones diferentes de la misma interacción, que a partir de ahora tendrá que llamarse *electrodébil*.

El descubrimiento de  $W$  y  $Z$ , los bosones vectoriales previstos por la nueva teoría, realizado por Carlo Rubbia en 1983, marcará el triunfo definitivo del Modelo Estándar.

Sin embargo, bajo la pátina del éxito se ocultaba una grieta profunda, una debilidad inherente a la teoría que podría haber causado el derrumbe del arquitrabe y provocar el colapso de todo el edificio.

Todo surgía de la más simple de las preguntas: ¿cómo es posible que las dos interacciones, tan diferentes entre sí, sean manifestaciones de la misma fuerza? La fuerza electromagnética tiene un radio de acción infinito, mientras que la interacción débil solo se manifiesta en las ínfimas distancias subnucleares. Una ley general de la física nos dice que el radio de acción de una fuerza es inversamente proporcional a la masa de la partícula que la transporta. El fotón tiene masa cero y, por lo tanto, la interacción electromagnética alcanza las distancias más exorbitantes. Por el contrario,  $W$

y Z son muy masivos, pesan tanto como 80-90 protones, y su radio de acción es minúsculo. La fuerza débil actúa dentro de los núcleos y por esa razón no nos percatamos de su presencia hasta hace poco tiempo.

Pero entonces, ¿cómo es posible que el fotón, carente de masa, promedie la misma interacción electrodébil transportada por W y Z? ¿Qué es lo que diferencia realmente a W y Z del fotón? ¿Qué es exactamente la dimensión que llamamos *masa*?

## LA BELLEZA DE LA SIMETRÍA QUEBRADA

Castelfranco Veneto es una de las muchas joyas ocultas de Italia. Ha conservado la estructura original de la ciudad amurallada, crecida dentro del castillo que lo defendía. La catedral que, como es de rigor, fue construida en el centro de la ciudad, es una hermosa construcción neoclásica. Se trata de una iglesia de dimensiones contenidas, nada comparable a las grandes basílicas. Pero tan pronto como entramos y llegamos a la capilla de Costanzo, a la derecha del presbiterio, nos quedamos sin aliento. En el altar sobresale el retablo de Giorgione, obra maestra del pintor de Castelfranco, cuya casa natal aún puede visitarse en la pequeña plaza de al lado.

Giorgio Barbarelli, pues ese era su verdadero nombre, tuvo una breve vida, pero legó al mundo obras inolvidables. Tiene solo veinticinco años cuando, en 1503, empieza a pintar el retablo que le ha encargado Tuzio Costanzo, un condotiero originario de Messina, a sueldo de la Serenísima para guiar sus ejércitos. El retablo que desea está destinado a la capilla mortuoria de su hijo, Matteo, abatido por fiebres palúdicas a los veintitrés años, cerca de Rávena, durante una campaña militar.

Giorgione decide romper con la tradición. Los pintores más grandes que le precedieron —desde Piero della Francesca hasta su propio maestro, Giovanni Bellini— acostumbraban a colocar a los personajes en el centro de una construcción ideal, enmarcada en un refinado juego de perspectivas que a veces evocaba las líneas de la iglesia en la que se colocaban las telas. Giorgione conserva la marcada estructura iconográfica de la pirámide, en la parte superior de la cual está sentada la Virgen con el Niño, pero decide romper la perspectiva y abrirla al exterior. El trono, muy alto, sobrenatural, casi metafísico se destaca contra un paisaje de una dulzura desgarradora, inmerso en una luz difuminada que envuelve los campos y las colinas. En las figuras y en el fondo se celebra el triunfo de la pintura tonal veneciana, el

toque que diferenciaba a los pintores de la Serenísima de los florentinos, esa «pintura sin dibujo» de la que habla Giorgio Vasari en sus *Vidas*. Una sabia técnica a base de veladuras de color superpuestas, que evita cualquier transición abrupta entre luces y sombras, envolviendo todos los bordes en un claroscuro difuso y delicado.

La enorme tabla tiene una doble simetría axial: altobajo y derecha-izquierda. Una enorme tela de terciopelo rojo oscuro delimita el mundo terrenal, con el pavimento ajedrezado, regular y ordenado, sobre el cual descansa la base del trono y las dos figuras de los lados. En lo alto, el mundo celestial que se recorta contra el paisaje de melancolía conmovedora con la figura de la Virgen Madre en el centro.

La perfecta simetría se quiebra en la parte superior con la figura del Niño, sentado en la rodilla derecha de la Virgen, absorto en la conciencia de su destino. Abajo, las dos figuras tienen la misma postura y están situadas en una posición perfectamente simétrica con respecto al eje mediano de la pintura; ambas miran directamente a los ojos del observador y lo trasladan al interior de la representación, pero el contraste entre ellos no puede ser más acusado. San Francisco, a la derecha, vestido con el humilde sayo con el que se presentó, inerme y desarmado, en Damietta para llevar su mensaje de paz al sultán de Egipto al-Malik al-Kamil. A la izquierda, en cambio, la armadura resplandeciente y lustrosa de san Nicasio, un fraile-guerrero de la Orden Hospitalaria de San Juan de Jerusalén. Luchó, como cruzado, en Tierra Santa y, tras ser hecho prisionero en la batalla de Hattin, fue decapitado en presencia de Saladino, el tío del sultán que, años después, dialogará pacíficamente con el santo de Asís. Nicasio lleva el estandarte hierosolimitano, la bandera con la cruz que se convertirá en la enseña de los Caballeros de Malta y la pica que lo sostiene es el último y más importante elemento de ruptura de todas las simetrías: al invadir el espacio celeste rompe la división entre los dos mundos, y, además, quiebra con una agresiva diagonal el orden vertical de la composición. Aquí tenemos, pues, en una sola pintura, esa ruptura de la simetría manejada con dominio absoluto que convierte el cuadro en una obra maestra de novedad y belleza.

Volvemos a encontrar la fascinación de la «simetría quebrada» en muchas producciones artísticas. El ritmo ordenado de la simetría perfecta es apaciguador y tranquilizador, pero corre el riesgo de ser plano; no emociona porque no provoca sorpresa; el elemento de ruptura inquieta pero intriga a la vez, nos insta a salir de las certezas y a tratar de entender hacia dónde nos conduce este resquebrajamiento del equilibrio. Por un momento vacilamos, nos asaltan ciertos temores ante la novedad inesperada y los riesgos que esta conlleva; luego el artista nos sosiega devolviéndonos a una construcción bien conocida. Como cuando perseguimos una variación sobre el tema dominante de la sinfonía, temiendo perdernos y solo nos tranquilizamos cuando lo

volvemos a encontrar de nuevo, en una suerte de abrazo consolador final. Son todas ellas técnicas conocidas y practicadas con gran habilidad por grandes pintores o músicos geniales, como Bach y Mozart. De tal desviación nace el secreto del hechizo insuperable de las grandes obras maestras, desde la insólita inclinación de la Torre de Pisa o la sonrisa asimétrica e intrigante de Mona Lisa, hasta las esculturas en bronce dorado de Arnaldo Pomodoro: esas esferas pulidas y perfectas, hijas de una mágica relación matemática, que él desgarró y desarma, mostrando su interior atormentado.

Si romper la simetría en el campo artístico es un acto deliberado que crea fascinación y estupor, ¿por qué la naturaleza parece incapaz de resistir a la misma tentación?

El universo que surgió de la fase inflacionaria es el reino de la perfección. Las leyes de la física que la regulan son maravillosamente simétricas. ¿Por qué romper un mecanismo casi perfecto?

Para comprender el papel de la estructura espontánea de simetría para la física puede recurrirse a un ejemplo mecánico: un lápiz apoyado de punta sobre una superficie plana. El estado inicial del sistema es perfectamente simétrico. El lápiz puede girar sobre sí mismo y las leyes de la física siguen siendo las mismas, porque el campo gravitacional es simétrico por rotación alrededor del eje vertical. Es una forma de decir que el lápiz, al caer sobre la superficie de la mesa, puede tomar cualquier dirección. El estado simétrico es inestable y, si se le deja suelto, el lápiz caerá. En el plano horizontal, el lápiz es estable, pero ha roto la simetría rotacional del campo gravitacional al elegir una dirección particular. Cayendo sobre la superficie el lápiz ha perdido energía y simetría, pero ha ganado estabilidad y multiplicidad.

Algo parecido sucedió en el universo primordial. El estado incandescente inicial tiene un alto nivel de simetría, pero es inestable; al enfriarse pierde su simetría y gana estabilidad.

Pero ¿cuál era el estado de energía más bajo en el que se instalaba el universo? ¿Qué mecanismo podía conseguir que la simetría electrodébil se rompiera espontáneamente?

El problema se planteó desde los primeros vagidos de la teoría electrodébil y se propusieron distintas soluciones, ninguna de ellas realmente convincente. La idea correcta se les ocurrió en 1964 a tres jóvenes científicos de treinta y pocos años: Robert Brout y François Englert, dos belgas, y otro casi de la misma edad, inglés, Peter Higgs.

Una vez más, algunos jóvenes proponen una idea nueva, fuera de los esquemas, que al principio nadie toma en consideración porque es realmente revolucionaria.

Si las ecuaciones de las dos interacciones son las mismas, lo que rompe la simetría solo puede ser el medio en el que se propagan. Es decir, el vacío. En otras palabras, es el vacío el que «rompe la simetría», porque el vacío no

está... vacío. Hay un campo que lleva ocupando cada rincón del universo desde tiempos inmemoriales. Es el campo de Higgs, producido por una partícula escalar fundamental, que debe añadirse a las partículas del Modelo Estándar. Solo de esta manera podemos explicar por qué la fuerza electromagnética y la fuerza débil tienen comportamientos tan diferentes que dan la impresión de no ser parientes, ni siquiera lejanos.

En cambio, en el pequeño universo incandescente de los orígenes, el campo de Higgs se hallaba en un estado de excitación tal que lo volvía todo perfectamente simétrico. A medida que la temperatura disminuye, este se congela en un estado de equilibrio de energía inferior que rompe la simetría original. W y Z se vuelven masivos porque permanecen fuertemente enredados en el campo que los atrapa, mientras que el fotón continúa correteando por todas partes, carente de masa: no se percata siquiera de la novedad, porque el campo ni siquiera le hace cosquillas.

Un mecanismo análogo explica por qué los leptones y los quarks tienen masas tan diferentes. Ellos también nacen, todos, democráticamente, carentes de masa. Es el campo de Higgs el que selecciona y distingue las partículas masivas de las partículas ligeras. Cuanto más fuerte es la interacción con el campo, mayor es la masa de la partícula.

Todo encajaba, con elegancia... excepto por un pequeño detalle. ¿Existía de verdad ese campo de Higgs? ¿Quién podía estar seguro de que esa elegante solución era realmente la elegida por la naturaleza? Si había un campo en algún lugar, tendría que aparecer tarde o temprano la partícula asociada con él: fue el comienzo de la gran carrera para descubrir el bosón de Higgs.

## EL DESCUBRIMIENTO DEL BOSÓN DE HIGGS

Para verificar que el mecanismo de Higgs era realmente el responsable de la ruptura de la simetría electrodébil tuvimos que esperar casi cincuenta años. Eso fue lo que duró la búsqueda de la partícula más esquivada de la historia de la física.

La teoría no preveía qué masa podía tener el bosón de Higgs, que por lo tanto podría estar oculto en cualquier sitio. Durante décadas, científicos de todo el mundo hicieron esfuerzos sobrehumanos para tratar de aferrar la nueva partícula sin obtener resultados. Ahora que ya la hemos descubierto, sabemos que eso sucedía porque el Higgs era tan pesado que la energía de los aceleradores en funcionamiento hasta 2010 no bastaba para producirlo. El

punto de inflexión llegó con la construcción del LHC, el gran acelerador del CERN en Ginebra.

Los aceleradores de partículas son modernas *máquinas del tiempo*: nos hacen retroceder miles de millones de años, lo que nos permite estudiar los fenómenos del origen de nuestro universo. En las colisiones se golpea el vacío y se extraen partículas materiales. Es una aplicación de la famosa relación de equivalencia entre masa y energía de Einstein. Cuando un haz de partículas choca con otro, la energía del impacto puede transformarse en masa,  $E=mc^2$ : cuanto mayor es la energía, más pesadas son las partículas que pueden producirse y estudiarse en todos sus detalles. Por lo tanto, son *fábricas de partículas extintas*, que devuelven a la vida, durante fracciones de segundo, formas de materia que desaparecieron inmediatamente después del Big Bang.

El LHC es el acelerador más potente actualmente en funcionamiento en el mundo. Dos haces de protones compuestos por miles de paquetes circulan en direcciones opuestas en un tubo de vacío de 27 kilómetros de circunferencia. En cada paquete se concentran más de cien mil millones de protones que son acelerados por campos eléctricos muy fuertes, mientras potentes imanes pliegan sus trayectorias para mantenerlos en órbita y llevarlos a colisionar. La energía del LHC es de 13 TeV, pero dado que los protones están hechos de quarks y gluones, sus colisiones son bastante complicadas y solo constituyen una parte de la energía disponible, algunos TeV, pueden transformarse en partículas masivas. Los pesados protones, sin embargo, pierden poca energía por irradiación y, por lo tanto, es fácil empujarlos hacia energías más altas. Por ello, los aceleradores de protones son las máquinas más adecuadas para el descubrimiento directo de nuevas partículas.

Los aceleradores de electrones tienen una función complementaria. Al tratarse de partículas puntuales, sus colisiones son mucho más sencillas y toda la energía de la colisión puede utilizarse para producir nuevas partículas. Son las máquinas ideales para realizar mediciones de alta precisión e intentar descubrir nuevas partículas indirectamente, es decir, a través de la búsqueda de anomalías sutiles.

La desventaja de los aceleradores de electrones es que no permiten alcanzar energías demasiado elevadas. Partículas ligeras como los electrones, cuando se mueven en órbitas circulares, irradian grandes cantidades de fotones y dejan escapar de esta manera una fracción significativa de su energía. Esta pérdida aumenta drásticamente a medida que crece la energía y constituye en última instancia una barrera infranqueable que limita su potencial para el descubrimiento directo de nuevas partículas.

Las energías que se desprenden de las colisiones de partículas producidas por los aceleradores son insignificantes en comparación con nuestra vida diaria. Pero allí, concentradas en el espacio infinitesimal en el que se producen estos choques, se recrean las condiciones extremas que no habían

vuelto a verificarse desde la época del Big Bang. En estas colisiones, ocultas entre una infinidad de fenómenos bien conocidos y más convencionales, se producen esos acontecimientos especiales que nos permitieron identificar el bosón de Higgs.

El resultado fue posible gracias al trabajo de dos grupos de investigación distintos llamados ATLAS y CMS, formados cada uno de ellos por miles de científicos. La decisión de realizar dos experimentos al buscar nuevas partículas es casi obligatoria. Las señales que se persiguen son tan raras y las posibilidades de cometer errores tan altas que solo mediante dos experimentos independientes, basados en diferentes tecnologías y realizados por diferentes grupos de científicos, es posible alcanzar la certeza de que no se trata de una falsa alarma.

ATLAS y CMS fueron concebidos para funcionar de forma totalmente independiente y entre ellos hay una fuerte competencia: si uno logra descubrir antes un nuevo estado de la materia, y el otro llega después y solo puede confirmar el resultado, toda la gloria del descubrimiento corresponderá al primero. Por eso resulta difícil conciliar el sueño en esa clase de colaboraciones: la pesadilla de que algo salga mal o de que el otro grupo gane la carrera siempre está a la vuelta de la esquina.

Debido a una serie de circunstancias que tienen mucho de increíble, lo que sucedió en cambio es que los dos experimentos funcionaron a la perfección y los dos grupos llegaron juntos a la línea de meta. Identificaron simultáneamente los primeros signos de la presencia del Higgs en los datos y luego, cuando la señal era tan fuerte como para no dejar lugar para la duda y la prudencia, anunciaron juntos al mundo, en 2012, el descubrimiento de una nueva partícula. El recién nacido tiene una masa de 125 GeV y era, en todos los aspectos, similar al bosón de Higgs predicho por los «muchachos del sesenta y cuatro».

Con este resultado, el Modelo Estándar celebró un nuevo triunfo que quedará refrendado por el premio Nobel, otorgado en 2013 a François Englert y Peter Higgs, los dos supervivientes del trío de jóvenes científicos que fueron los primeros en plantear la hipótesis de su existencia.

## ¿QUIÉN ROMPIÓ LA SIMETRÍA ENTRE LA MATERIA Y LA ANTIMATERIA?



Ahora que hemos descubierto las nuevas partículas, las cosas se vuelven más claras: podemos entender mejor cuándo tuvo lugar la transición y delinear las características del mecanismo de ruptura espontánea de la simetría electrodébil.

La hora X depende de la masa del bosón de Higgs, a la que corresponde a una temperatura precisa del universo primordial, que se alcanzó  $10^{-11}$  segundos después del Big Bang. A partir de ese momento, la interacción electromagnética se separa definitivamente de la débil, y comienza un largo proceso que llegará hasta nosotros. Como el lápiz que cae sobre la mesa, el universo ha perdido simetría, pero ha adquirido multiplicidad y estabilidad. Todo lo que nos rodea, la maravilla de esta infinita variedad de formas que aún nos sorprende, no podría haber nacido si la infernal simetría que la encerraba no se hubiera roto. El beso del bosón de Higgs rompió el hechizo que encarcelaba a la princesa en la perfección mortal de la uniformidad absoluta. De esa brecha, de ese pequeño *defecto* primordial, brotó todo.

Hoy puede describirse el potencial asociado con el nuevo campo escalar y comprender mejor el mecanismo que ha tenido un papel tan importante en la construcción de la estructura material del universo.

Tal vez se esconda también en ese momento mágico la clave para resolver el misterio de la antimateria; con este fin, con el descubrimiento del bosón de Higgs, van apareciendo nuevas hipótesis.

La primera idea de la antimateria se remonta a 1928 y nace, casi por casualidad, de los cálculos de Paul Adrien Maurice Dirac. El jovencísimo científico inglés, quien tenía por entonces veintiséis años, estaba intentando formular una teoría que explicara el comportamiento de las partículas subatómicas a altas energías. Para hacerlo, debía conciliar la descripción de las partículas proporcionada por la mecánica cuántica con las transformaciones debidas a los efectos relativistas. Cuando completó la ecuación relativista del movimiento para los electrones, advirtió no sin estupor que la misma valía también para los *electrones positivos*. Lo que inicialmente parecía una pura coincidencia formal no tardó en considerarse el descubrimiento de otra simetría fundamental de la naturaleza. La mecánica cuántica relativista nos dice que, por cada partícula dotada de carga, debe existir otra partícula con una masa idéntica pero de carga opuesta: lo que ahora llamamos *antipartícula*.

La existencia de componentes elementales de un *antimundo* era en sí misma una idea tan extraña que al principio nadie se la tomó en serio. Las cosas cambiaron cuando otro joven físico de Caltech, Carl David Anderson, de veintisiete años, centró su atención en algunas extrañas señales que aparecían en el detector con el que estudiaba los rayos cósmicos. Después de interminables verificaciones, su conclusión fue inequívoca: se trataba de partículas que tenían la misma masa que el electrón, pero carga positiva.

Habían sido descubiertos los primeros *positrones*; la *antimateria*, por rara que fuera, era un componente real de nuestro mundo material.

Desde entonces, con impecable regularidad, a medida que crecía el catálogo de nuevas partículas se enriquecía de forma paralela también la de sus socios de carga opuesta.

La antimateria se ha vuelto ya bastante común. Se produce, para usarla o para estudiar sus propiedades, en muchos aceleradores de partículas, pero también se emplea para actividades clínicas rutinarias en muchos hospitales. El ejemplo más común es la PET, la tomografía por emisión de positrones, un examen de diagnóstico que permite la reconstrucción de imágenes funcionales de órganos a partir de la aniquilación de positrones y electrones.

Una de las propiedades que más ha impresionado a la imaginación colectiva es precisamente esta característica: las partículas y antipartículas que entran en contacto se transforman en pares de fotones de energía total igual a la masa del sistema inicial. Esta transformación muy eficiente de materia y antimateria en energía ha dado lugar a filones enteros de obras de ciencia ficción.

En efecto, ninguna reacción puede competir con el proceso de aniquilación. La energía que podría producirse combinando un kilo de materia con un kilo de antimateria sería setenta veces mayor que la generada al inducir la fusión nuclear de un kilo de hidrógeno en helio y cuatro mil millones de veces superior a la producida por la combustión de un kilo de petróleo. El problema es que nadie ha encontrado hasta ahora un mecanismo eficiente para producir grandes cantidades de antimateria. Los aceleradores de partículas producen cantidades infinitesimales con monstruosos costes energéticos y materiales. Se estima que para producir 10 miligramos de positrones habría que gastar 250 millones de dólares. En definitiva, la antimateria costaría 25 000 millones de dólares por gramo, lo que lo convertiría en el material más raro y caro de la Tierra con diferencia. Por ahora, por lo tanto, el proyecto para construir naves espaciales con propulsores de antimateria, como el Enterprise de *Star Trek*, no resulta rentable.

Desde sus primeras formulaciones, el concepto de antimateria va acompañado por una pregunta a la que la física aún no ha sabido dar respuesta: si las ecuaciones son simétricas y describen de manera equivalente el comportamiento de materia y antimateria, ¿por qué nuestro mundo está dominado por la materia? Es natural pensar que, al final de la fase inflacionaria, la energía excedente extraería del vacío cantidades iguales de materia y antimateria. Pero la antimateria parece haber desaparecido definitivamente del universo que nos rodea. ¿Dónde ha ido a parar?

Para responder a esta cuestión, miles de investigadores se han puesto manos a la obra, siguiendo caminos muy diferentes entre sí. La primera

hipótesis baraja la posibilidad de que grandes concentraciones de antimateria hayan acabado en regiones aún inexploradas del espacio; mundos enteros hechos de antimateria, gigantescas galaxias de antiprotones y positrones que han eludido hasta ahora todas nuestras observaciones.

La segunda línea de investigación supone que todo se debe a una sutil diferencia de comportamiento entre la materia y la antimateria, una pequeña anomalía que rompe la simetría original y es la base de todo. Se han realizado estudios pormenorizados y, en efecto, se han encontrado distintos mecanismos que dan a la materia una levísima prevalencia en procesos de descomposición de partículas y antipartículas. Estas diferencias están previstas en el Modelo Estándar, pero la preferencia concedida a la materia es demasiado pequeña como para explicar el exceso de presencia que observamos a nuestro alrededor.

Por último, se ha planteado otra hipótesis en los últimos años. Todo podría haber sido determinado por algo muy especial que sucedió justo cuando el bosón de Higgs ocupó el centro del escenario y rompió la perfecta simetría que dominaba el universo primordial. Una ligera preferencia pudo ser suficiente para que se emparejara con partículas en lugar de antipartículas y así fue cómo se produce el universo material que nos rodea.

Pero también están surgiendo otras hipótesis. Como que la asimetría haya nacido precisamente de las modalidades con las que se produjo la transición de fase. En función de la velocidad con la que se llevó a cabo este pasaje, una anomalía local podría haberse convertido en propiedad general del nuevo sistema y en ese momento se creó la bifurcación. Nuestro universo material tomó entonces el camino de la materia, abandonando definitivamente el de la antimateria.

Para estudiar en detalle estos fenómenos, sería necesario producir decenas de millones de bosones de Higgs y medir con detalle sus más diminutas características, en busca de cualquier posible anomalía. Estos son los estudios que se están realizando mediante el LHC, a medida que se incrementa la luminosidad de la máquina para producir más colisiones. Pero podría ocurrir que, para comprender realmente lo que sucedió, necesitemos construir un acelerador aún más potente. De tanta energía como para perturbar el campo de Higgs y reconstruir todos los pasos de esa fatídica transición, estudiando su comportamiento lejos de esa cómoda posición de equilibrio en la que lleva miles de millones de años descansando.

## LA MÁS PROFUNDA DE LAS SIMETRÍAS

Bajo el nombre de supersimetría se oculta en realidad una compleja familia de teorías hermanadas por la hipótesis de que cada partícula conocida tiene un socio supersimétrico, es decir, una partícula idéntica en todos los sentidos, excepto que es mucho más pesada y tiene un espín diferente, que difiere en  $\pm 1/2$ . A los fermiones ordinarios, con un espín semientero  $1/2$ , por lo tanto, le corresponden bosones supersimétricos con espín entero  $(0,1)$ , mientras que a los bosones ordinarios les corresponden fermiones supersimétricos. En el *supermundo* son los fermiones los que impulsan las interacciones y los bosones para constituir la materia.

La teoría prevé que esta forma superior de simetría también se haya roto en los primeros momentos después del Big Bang. En otras palabras, las partículas supersimétricas poblaban el entorno incandescente del universo primordial en igual proporción que la materia ordinaria. Pero el rápido enfriamiento debido a la expansión provocó su extinción masiva. Incapaces de sobrevivir, se desintegraron casi de inmediato en materia ordinaria, y por esta razón ya no nos los encontramos por ahí.

En realidad, puede haber habido excepciones. La teoría prevé la posible existencia de partículas supersimétricas estables, es decir, que no puedan descomponerse en nada. Estas partículas pesadas, que interactuarían solo débilmente, podrían formar enormes cúmulos capaces de generar una intensa atracción gravitacional. De ser así, esto nos permitiría comprender el origen de la materia oscura que mantiene unidas las galaxias y los cúmulos de galaxias. Estas enormes concentraciones de partículas supersimétricas estables podrían ser el residuo fósil de esa era primordial en la que la materia supersimétrica dominaba el mundo.

El atractivo de SUSY, el acrónimo con el que se denomina el conjunto de las teorías supersimétricas, proviene también del hecho de que de esta teoría se deriva un escenario más simple para la unificación de las interacciones fundamentales en el que habría también un lugar especial para el bosón de Higgs. La partícula descubierta en 2012 sería en realidad la primera de toda una familia de súper Higgs y la supersimetría nos permitiría comprender mejor por qué tiene una masa de 125 GeV. Partículas supersimétricas virtuales lo protegerían de la inestabilidad que afecta, por efectos cuánticos, a un escalar de esa masa, construyendo a su alrededor una especie de coraza protectora.

Sin embargo, para que esta teoría se verifique, no es suficiente con que sea elegante y con que goce de una considerable popularidad entre los físicos teóricos. Hace falta que estas partículas tan extrañas sean identificadas en los

datos de algún experimento, algo que hasta ahora no se ha producido. Por lo tanto, podría ocurrir que la teoría esté equivocada. O que las partículas supersimétricas sean tan pesadas que ni siquiera podamos producirlos con el LHC. En este caso, podríamos percatarnos de su presencia a través de sus efectos *virtuales*. Las partículas ultramasivas pueden flotar como fantasmas alrededor de partículas conocidas e interferir con los mecanismos conocidos previstos por el Modelo Estándar. Esto crearía anomalías que podrían ser registradas por nuestros detectores y constituir un importante descubrimiento «indirecto» de la nueva física.

He ahí la razón por la que la búsqueda de la supersimetría prosigue en distintos frentes al mismo tiempo. Aprovechando el aumento de energía del LHC, que funciona a 13 TeV desde 2015, se confía en conseguir producir esas partículas masivas que han eludido todas las indagaciones realizadas hasta ahora. Al mismo tiempo, se busca a los primos del Higgs en la región que ya se ha explorado en la búsqueda del escalar del Modelo Estándar. Lo que se ha hecho hasta ahora no es suficiente, porque lo que se busca son partículas con características muy diferentes. Los primos supersimétricos de los Higgs tienen modalidades peculiares de producción y decadencia y, por lo tanto, hay que desarrollar estrategias muy específicas. Además, hace falta una gran cantidad de datos, porque podría tratarse de partículas más difíciles de producir y más raras de encontrar.

Independientemente de todo esto, prosiguen los estudios sobre el bosón de Higgs a 125 GeV. El Modelo Estándar ha predicho todas sus características con gran precisión. Hasta ahora, todo lo que hemos visto es congruente con las predicciones, pero nuestra precisión está limitada por la pequeña cantidad de bosones que hemos podido producir y reconstruir. Para muchos procesos de descomposición la incertidumbre de nuestras mediciones es todavía demasiado elevada y podría ocultar las anomalías previstas por SUSY.

El LHC no cesa en su tarea de investigación precisa, paciente y sistemática. Nada quedará sin intentar en la búsqueda de señales inconfundibles de supersimetría con la esperanza secreta de que el bosón de Higgs, tan recientemente descubierto, pueda actuar como un portal que se abra a la nueva física, y que cuanto sucedió en 2012 pueda ser el primer eslabón de una larga cadena de descubrimientos.

La física está viviendo un momento de profunda transformación. Ahora que se ha encontrado la última partícula que quedaba por descubrir, el Modelo Estándar de las interacciones fundamentales ha quedado completado. Pero en el preciso momento en el que se celebra otro triunfo de esta teoría, todos son conscientes de que la lista de los fenómenos para los que esta no proporciona explicación alguna es tan larga como para resultar francamente embarazosa.

Aún no se entiende la dinámica exacta de la inflación, ni es posible unificar de manera coherente las fuerzas fundamentales, incluida la gravedad. Los mecanismos que llevaron a la desaparición de la antimateria nos resultan totalmente desconocidos, por no mencionar los fenómenos que podrían explicar la materia y energía oscuras.

Todos son conscientes de que tarde o temprano el Modelo Estándar tendrá que ser redimensionado. Probablemente se convertirá en un caso particular de una teoría más general, capaz de ofrecer una descripción nueva y más completa de la naturaleza. Lo hermoso del trabajo de investigación es que nadie sabe a ciencia cierta cuándo ocurrirá algo así. Cualquier día podría ser el día bueno: sería suficiente con que en el último análisis de los datos del LHC saliera a la luz un nuevo estado de la materia; o tal vez hagan falta años de intentos y acaso una nueva generación de maquinarias aceleradoras.

De esta manera, mientras el trabajo prosigue, se van proyectando ya los instrumentos del futuro. Los plazos de desarrollo y puesta en marcha de un nuevo acelerador se miden en décadas. Las primeras discusiones acerca del LHC comenzaron a mediados de los años ochenta y la nueva máquina se terminó en 2008. Si estamos pensando en un nuevo acelerador que empiece a operar hacia 2035-2040, es hora de actuar. No es casualidad que a principios de 2019 el CERN haya publicado el informe que describe el Proyecto FCC, acrónimo de *Future Circular Collider*, futuro colisionador circular, los aceleradores herederos del LHC.

FCC es un grupo internacional de estudio cuyo objetivo es elaborar un proyecto, definir las infraestructuras y estimar los costes para construir un colisionador de 100 kilómetros en el CERN. El proyecto prevé, en una primera fase, un acelerador que producirá colisiones entre electrones y positrones, FCC-EE, que más tarde se convertirá en una máquina protón-protón, FCC-HH, siguiendo el esquema ya experimentado con éxito en el CERN con la secuencia LEP y LHC.

La propuesta, nacida en 2014, obtuvo de inmediato un fortísimo apoyo por parte de la comunidad internacional. El proyecto involucra a más de 1300 físicos e ingenieros pertenecientes a 150 universidades, institutos de investigación y socios industriales. El resultado del estudio es un informe detallado que constituye la base para definir la nueva estrategia europea en el campo de los aceleradores de partículas.

La decisión de construir esta nueva infraestructura debería tomarse en 2020. En un escenario realista, la construcción de FCC-EE podría comenzar en 2028 para que iniciara sus operaciones antes de 2040. La máquina de protones, en cambio, es mucho más compleja y requeriría aún años de desarrollo para la producción a escala industrial de imanes. El comienzo de FCC-HH puede situarse entre 2050 y 2060.

En resumen, se están tomando decisiones cruciales que determinarán los confines de la investigación científica básica de todo un siglo.

Desde el punto de vista investigativo, la combinación de los dos aceleradores en sucesión es, con mucho, la configuración óptima. Se presenta como una especie de maniobra de pinza para no dejar escapatoria a la nueva física, se esconda donde se esconda.

La máquina de electrones y positrones es el entorno ideal para realizar mediciones de precisión del Higgs y de los parámetros fundamentales del Modelo Estándar. La previsión es que el nuevo acelerador funcione al principio a 90 GeV para producir una enorme cantidad de Z, para pasar después a 160 GeV para generar parejas de W, elevarse a 240 GeV para producir millones de Higgs en asociación con Z y, por último, alcanzar los 365 GeV para crear parejas de quarks cima, los más pesados de todos los quarks.

Las nuevas partículas, que explicarían la materia oscura o las nuevas interacciones que nos llevarían a las dimensiones ocultas de nuestro universo, podrían ser descubiertas de manera indirecta a través de las mediciones de precisión más increíbles de los parámetros del Modelo Estándar que hasta ahora hayan sido concebidas.

Si con la precisión no fuera suficiente, pasaríamos a la fuerza bruta. Con los 100 TeV de energía de FCC-HH, será posible la exploración de una escala de energía siete veces mayor que la del LHC. Cualquier nuevo estado de la materia, de la masa comprendida entre algunos TeV y algunas decenas de TeV, podría ser identificado directamente; se podrá entender por fin si el bosón de Higgs es elemental o si tiene una estructura interna y será posible estudiar esos detalles de la ruptura espontánea de la simetría electrodébil que podrían resultar decisivo para comprender la prevalencia de la materia en el mundo.

El coste del proyecto es considerable. Harán falta 9000 millones de euros para excavar el túnel y equipar la máquina de electrones. Se necesitarán otros 15 para construir los potentes imanes necesarios para FCC-HH. Pese a todo, considerando el arco de tiempo en el que se distribuirá la inversión, y se tienen en cuenta las contribuciones financieras procedentes de todo el mundo, la empresa parece claramente sostenible. No hay duda de que con FCC, Europa lanza su desafío y ocupa el centro del escenario en el debate global sobre los aceleradores del futuro.

Estados Unidos, el líder indiscutible en este campo hasta hace algunas décadas, mantiene un perfil bajo y parece resignado a desempeñar un papel secundario. Completamente distinto es el caso de los tigres asiáticos, no solo ya Japón, sino también Corea del Sur y, de forma especial, China.

Las inversiones en investigación de base en China crecen año tras año. Y con porcentajes que los europeos no nos atrevemos siquiera a soñar. Entre 2000 y 2010, estas inversiones se duplicaron y hoy China gasta más que toda Europa en investigación y desarrollo. Ha lanzado incluso un ambicioso programa de exploración espacial que incluye una estación científica en órbita y una misión de exploración lunar, y abre cada año decenas de nuevas universidades e importantes infraestructuras de investigación.

La clase dirigente china da claras muestras de haber entendido que las inversiones en ciencia de base permiten incorporar al país a la élite tecnológica mundial. Pero su proyecto es mucho más ambicioso: su pretensión no es solo la de participar, sino que han decidido sobresalir en actividades que consideran de importancia estratégica para una superpotencia que tiene como objetivo liderar el mundo entero.

No es casualidad que, en el ámbito de la física, el gigante asiático proponga el CEPC (Circular Electron Positron Collider), un proyecto muy parecido a nuestro FCC: un anillo de 50-70 kilómetros en el que se alojaría una *fábrica de Higgs*, un colisionador de electrones-positrones de 240 GeV, para pasar luego a un acelerador de protones capaz de producir colisiones de 50-70 TeV en el centro de masa.

La máquina podría construirse en la región de Qinghuada, una zona de colinas próxima al mar, a 300 kilómetros de Pekín, conocida como la Toscana de China. Excavar un túnel de decenas de kilómetros en China tiene costes mucho más bajos que en Europa y, además, los chinos parecen dispuestos a cubrir una buena parte.

En resumen, la propuesta de FCC, que llega precisamente en un período de crisis y divisiones como el que Europa atraviesa, podría ser la oportunidad adecuada para comenzar a pensar de nuevo a lo grande. Si nuestro continente pretende desempeñar un papel decisivo en el desarrollo de la innovación y el conocimiento, no aceptando ceder a otros el liderazgo en sectores estratégicos como la física fundamental, FCC constituye una gran oportunidad.

De esta manera, el estudio de lo que ocurrió con los orígenes de nuestro universo, hace 13 800 millones de años, se entrelaza con los desafíos científicos, tecnológicos y tal vez incluso políticos de nuestros días.



## Día 3

### Nacimiento de los inmortales

El traumático acontecimiento que ha separado para siempre la fuerza débil de la electromagnética acaba de producirse y, en apariencia, nada ha cambiado. El vacío electrodébil que se ha instaurado por todas partes no es visible ni puede tocarse tampoco. Lo perciben, sin embargo, los componentes de ese sistema caótico, un frenesí desencadenado por objetos puntiformes que se arremolinan por doquier.

El recién llegado diferencia el comportamiento de cada uno de los componentes, asigna papeles, define funciones. Es como si, en el sistema desordenado e indistinto, se hubiera instaurado, de repente, un orden interno, invisible aún, que pronto conducirá a transformaciones irreversibles. La aparente anarquía que domina las múltiples interacciones esconde ahora una sutil red de jerarquías y de organización. A partir de este momento, las transformaciones serán profundas. Una secuencia acuciante de acontecimientos llevará a algunos componentes elementales a condensarse en formas de organización cada vez más estables. Son los albores de un mundo material persistente, se están fraguando los ladrillos de base sobre los que tomará forma el gran edificio y pronto podremos reconocer elementos que nos son familiares.

El universo ha alcanzado ya un tamaño de 100 000 millones de kilómetros y continúa expandiéndose imparable. Su temperatura, por mucho que esté cayendo rápidamente, todavía se mide en billones de grados. En la agitación espasmódica de sus componentes empiezan a percibirse diferencias de comportamiento y algunas regularidades. Dentro de pocos instantes, con la disminución de la temperatura, los quarks más ligeros se congelarán en un estado muy particular. Un sistema complicado y genial, un estado ligado de quarks y gluones que ocupan una porción aceptable de vacío; una casa muy confortable, un espacio abundante, muy cómodo para acoger a tres quarks y a un cierto número de gluones; un auténtico parque de atracciones para los componentes elementales que se sentirán libres de perseguirse y adherirse los

unos a los otros, rodeados de partículas virtuales que los unen en un abrazo caótico y vortiginoso. El entorno está tan bien diseñado que durará para siempre. Nacen los primeros protones, constituyentes básicos de cualquier estructura material más compleja, tan sólidos y bien organizados que pueden considerarse virtualmente inmortales. Muchas otras formas de organización de la materia serán inestables, se transformarán en algo diferente, tal vez al cabo de una fracción de segundo o de un millón de años. No será así para el protón, cuya vida media será tan desmesurada que, en comparación, los 13 800 millones de años del universo pueden considerarse como un acontecimiento de duración insignificante.

Todo sigue incandescente, pero el universo entero no tardará en acabar bajo el dominio del *Genio del Frío*, cuyo reino no será temporal, como en *El rey Arturo* de Henry Purcell. El gran compositor barroco hace que despierte de su frío sepulcro, bajo el manto de las nieves perpetuas, mediante el empuje de una fuerza primordial que no existe en el universo. El gélido ambiente que nos rodea no conoce primaveras; Perséfone, la hija de Deméter raptada por el rey del inframundo, se ha comido todas las semillas de la granada y no podrá volver a subir a la superficie.

En este lugar tan inhóspito, nada más adecuado que los protones para sobrevivir. Constituirán la célula primordial de notas que se utilizarán para construir las sinfonías más complejas. Combinada en infinitas variantes, dará lugar a las variaciones más insólitas y a las recurrencias más tranquilizadoras, a partir de una inminente novedad a partir de la cual dará inicio la secuencia de otras transformaciones.

La masa específica que, por interacción con el vacío electrodébil, han adquirido los electrones les permitirán orbitar establemente alrededor de los primeros protones de modo que se puedan formar átomos y moléculas. Así se producirán las enormes nebulosas gaseosas de las que nacerán las primeras estrellas y más tarde las galaxias, y los planetas y sistemas solares hasta los primeros organismos vivientes, cada vez más complejos, para llegar, en última instancia, hasta nosotros. Esa secuencia de sonidos maravillosos está a punto de empezar. Sigamos a la escucha.

## EL MÁS PERFECTO DE LOS LÍQUIDOS

Solo ha pasado un microsegundo desde el Big Bang ( $10^{-6}$ , una millonésima de segundo), la temperatura supera los 10 000 millones de grados y todo el

universo fermenta con un material extraño. Se parece a un plasma, otro término que deriva del griego para indicar una especie de gelatina, algo maleable, en efecto. Así llamamos, por ejemplo, a los gases ionizados, es decir, llevados a temperaturas tan elevadas como para arrancar a los átomos todos sus electrones, de modo que el medio, que permanece eléctricamente neutro, en realidad está compuesto por partículas libres de carga opuesta. El plasma que ocupa el universo primordial no está formado por iones y electrones, sino compuesto por todo tipo de partículas que se mueven a velocidad relativista, especialmente por quarks y gluones. La fuerza fuerte a esas temperaturas es demasiado débil. Su constante de emparejamiento crecerá a medida que el universo se enfríe, pero no está por ahora en condiciones aún de contener la energía cinética para crear estados vinculados.

El plasma resultante de quarks y gluones es un gas que se parece a un fluido ideal. Sus componentes se deslizan unos sobre otros sin resistencia alguna, básicamente incapaces de interactuar entre sí. Es un líquido perfecto, de viscosidad prácticamente nula, un superfluido ideal, que fluye por todas partes sin esfuerzo, capaz de penetrar en cualquier intersticio que haya quedado vacío. Esta suerte de sopa fina, impalpable y ardiente, con sus extrañas propiedades, se ha estudiado al detalle desde que fue posible recrearla en el laboratorio. El resultado es relativamente reciente y se basa en el uso de potentes máquinas capaces de provocar la colisión de iones pesados.

Los aceleradores más comunes usan partículas puntiformes como los electrones, o protones como mucho, sistemas compuestos constituidos por un puñado de quarks y gluones. También en este caso las colisiones más energéticas se producen entre objetos sustancialmente puntiformes: sus componentes elementales, es decir, pares de gluones o quarks, chocan de frente, mientras el resto del protón se hace añicos.

Con las debidas cautelas, es posible inyectar, hacer circular y acelerar en las mismas máquinas objetos mucho más voluminosos y complejos, como los iones pesados. Se trata, en efecto, de núcleos de átomos ionizados, a los que han sido sustraídos, del todo o en parte, los electrones orbitales. Al estar cargados, pueden inyectarse en los aceleradores, adquirir energía y entrar en colisión con otros haces. Siendo más complejos y pesados, sus colisiones son mucho más espectaculares, auténticos fuegos artificiales de los que brotan decenas de miles de partículas.

Tomemos en consideración las colisiones entre iones de plomo que se realizan en el LHC. En este caso, se aceleran y se provoca el choque de núcleos muy pesados, compuestos por más de doscientos protones y neutrones, elevados todos a energías monstruosas.

Un núcleo ultrarrelativista se asemeja a una especie de disco compacto y delgado. La relatividad lo aplasta en la dirección del movimiento y los quarks y gluones que lo componen, con su masa que aumenta con la velocidad, hacen

que la densidad local de materia nuclear aumente rápidamente. Cuando dos discos, pertenecientes a haces contrapuestos, chocan centralmente, cara a cara, como suele decirse, es como si se superpusieran cientos de choques individuales. En el corazón de la colisión se verifica una temperatura local tan elevada que los quarks y los gluones, por una fracción de segundo, se funden para formar una gotita de ese fluido primordial, el plasma de quarks y gluones.

La energía de los aceleradores más modernos es tan elevada como para reproducir un minúsculo Big Bang en el laboratorio. El volumen infinitesimal en el que se produce este fenómeno se expande rápidamente debido a la temperatura extremadamente alta y, en un instante, el fluido pierde sus características, dando lugar a chorros de partículas conocidas. Pero las propiedades de estos productos secundarios, emitidos desde el centro de la colisión, nos permiten remontarnos a las características peculiares del superfluido originario.

## UN PROTÓN ES PARA SIEMPRE

Al cabo de unos pocos microsegundos, a medida que disminuye la temperatura, se supera la temperatura crítica que consiente la supervivencia del plasma de quarks y gluones. El universo está poblado, llegados a este punto, por una gran abundancia de fotones, con quarks y leptones que corretean por todas partes junto con los gluones, mientras que W y Z, que se han vuelto masivos, tienen un rango de acción limitado.

A medida que el universo se enfría, la interacción aportada por los gluones se vuelve cada vez más fuerte, cada gluon acaba por adherirse a algunos quarks y desaparecer de la vista, y la materia comienza a agregarse en estados pesados, genéricamente llamados *hadrones* («denso, fuerte», en griego, ya que están formados por quarks y sometidos a la fuerza fuerte). Los primeros intentos de producir materia estable se saldaron con fracasos: lo que nace son parejas de quarks y antiquarks enlazadas por gluones, pero el vínculo no dura mucho porque son inestables y se rompen rápidamente. Todo va bastante mejor cuando pueden formarse sistemas aparentemente más complejos, formados por tres quarks.

La nueva configuración ofrece de inmediato un aspecto muy prometedor. El triplete de quarks, unidos por gluones que revolotean entre ellos, adhiriéndose al uno o al otro, parece un sistema hecho a propósito para durar.

En realidad, cuando se usan los quarks más pesados, las cosas no funcionan demasiado bien. Por un instante, parece que todo está en su sitio, pero luego muestran también signos de inestabilidad e inmediatamente después, cuando la temperatura baja aún más, se disgregan produciendo minúsculos fuegos artificiales.

La verdadera sorpresa llega cuando empiezan a formarse tripletes de quarks más ligeros. La primera familia contiene los quarks  $u$  (*up*) y  $d$  (*down*), los más ligeros y menos llamativos, los que más débilmente interactúan con el campo escalar de Higgs y solo superan en peso a los ligerísimos leptones. Los gigantes  $t$  (*top*), miles de veces más masivos, lo intentan, pero no consiguen armar nada estable. Los pequeños, por el contrario, tienen éxito allí donde sus voluminosos primos fracasan irremisiblemente.

La arquitectura resultante tiene la simplicidad de las ideas geniales, como la mesa de tres patas que siempre encuentra su equilibrio y nunca se tambalea. Dos quarks  $u$  con carga  $+2/3$  junto con un  $d$  de carga  $-1/3$  constituyen un sistema con carga neta positiva  $+1$  que se llamará *protón*.

El recién llegado es una especie de arquetipo de estabilidad, una arquitectura ideal, hecha a propósito para durar. El conjunto de los tres quarks giratorios, enredados en la melaza de la fuerza fuerte aportada por los gluones, lo convierte en una especie de fortaleza inexpugnable. A pesar de la ligereza de sus componentes elementales, tiene una masa considerable, casi 1 GeV, dominada por la energía del campo de *fuerza fuerte* que lo mantiene unido. Los tres ligerísimos quarks están conectados por una enorme energía de enlace, muy superior a su masa. Es el *pegamento fuerte* que los mantiene unidos, el secreto oculto de la masa del protón, que gana de esta manera una estabilidad legendaria.

Dado que el universo sigue enfriándose cada vez más, a través de energías mucho más bajas que su energía de enlace, resultará cada vez más difícil hacer añicos los protones. Volverá a ocurrir cuando se aceleren a velocidades ultrarrelativas en las catástrofes estelares y vaguen como rayos cósmicos de alta energía. En el momento en que entren en colisión con otros cuerpos, se producirán las mismas reacciones de desintegración que los terrícolas conseguirán reproducir en sus aceleradores de partículas. Pero no dejan de ser fenómenos raros. En la gran mayoría de los casos, los tres quarks ligeros, inmersos en su mar de gluones pegajosos, seguirán tranquilos, resguardados de los cambios de un universo que evolucionará durante miles de millones de años.

Experimentos muy complejos han tratado de cuantificar en qué términos es estable el protón, es decir, dentro de qué límites podemos decir que se trata de una partícula inmortal. Los resultados son pasmosos.

Si el protón se desintegrara en otras partículas más ligeras, incluso a través de una descomposición muy rara, podría medirse su vida media. Sería

suficiente con identificar uno de estos procesos y la cosa estaría hecha. Dado que cabe esperar que sean muy raros y no pueden realizarse experimentos que duren siglos, la única posibilidad es mantener bajo control durante un tiempo razonable, digamos unos años, un número desmesurado de protones.

En el experimento Super-Kamiokande, en Japón, unos sensores especiales, capaces de identificar las desintegraciones más tenues, se sitúan en un enorme contenedor con cincuenta mil toneladas de agua ultrapura. Para evitar cualquier posible falsa alarma, se verifican las mínimas impurezas residuales del agua y todo se instala en una gran cueva en las profundidades de una mina. De esta manera, el experimento es menos sensible a las perturbaciones relacionadas con los rayos cósmicos, que podrían producir señales similares a las que se están buscando.

Hasta ahora, al no haberse observado descomposición alguna, solo han podido establecerse los límites inferiores de la vida media del protón, que resulta superior a los  $10^{34}$  años; en definitiva, dentro de los límites experimentales, su vida es eterna. Basta con pensar que la edad del universo es ligeramente superior a los  $10^{10}$  años. Parafraseando un famoso anuncio de joyería, podría decirse: «Un protón es para siempre». Si bien es verdad que, en términos de longevidad, no hay competencia posible entre los protones y los diamantes, existen en cambio muchas dudas sobre el efecto que puede causar el regalo de un aerosol de hidrógeno en lugar de un hermoso anillo de brillantes.

El interés en buscar procesos muy raros en los que un protón pueda descomponerse en otras partículas más ligeras está vinculado también a la validación experimental de las teorías de la Gran Unificación (TGU). Se trata de una hipótesis muy convincente para todos, respaldada por muchos datos experimentales, que considera que las tres interacciones fundamentales convergen en una sola fuerza para energías lo suficientemente altas. Dado que la unificación solo podría producirse a una escala de energía que actualmente es inalcanzable, no es posible observar directamente el fenómeno y estudiar todos sus detalles. Algunos modelos teóricos de la TGU prevén que, por mucho que ocurra muy raramente, incluso el protón debería descomponerse. De ahí que el descubrimiento de este proceso tan difícil de registrar podría darnos indicaciones más claras sobre la dinámica de la Gran Unificación.

Lo que sí puede anticiparse es que los protones constituyen todavía el componente principal de la materia ordinaria del universo. La mayor parte de la materia visible de las galaxias se encuentra en forma de plasma de hidrógeno, un gas ionizado caliente formado por protones y electrones libres. Si los protones fueran inestables, el plasma se disolvería como la niebla bajo los rayos del sol. Pero todo ello no sucede. Los protones —tanto si vagan libremente por el espacio o permanecen estrechamente atados a los núcleos de átomos— parecen ser auténticamente inmortales. Como los guerreros de *Los*

*inmortales*, una vieja película de los años ochenta, con Christopher Lambert y Sean Connery, los protones recorren las vicisitudes del universo desde tiempos inmemoriales y nada parece preocuparles el futuro.

## LIGEROS Y, PESE A TODO, INDISPENSABLES

Para construir la materia estable que conocemos nos faltan aún dos ingredientes. El primero es la versión neutral del protón: el neutrón. Se trata de un pariente cercano suyo, al que se parece en muchos aspectos. También está hecho de un triplete de quarks ligeros, solo que contiene dos quarks *d* (carga  $-1/3$  cada uno) y un quark *u* (carga  $+2/3$ ). El resultado es un objeto masivo también, pero carente de carga eléctrica. La masa es similar a la del protón, aproximadamente 1 GeV, dominada en este caso también por la energía de enlace del campo gluónico que lo mantiene unido. Pero el hecho de que sea neutro crea una minúscula pero importante diferencia. El neutrón es ligeramente más pesado que el protón, una nimiedad, solo 1,3 MeV, es decir, un 0,14 por ciento más, pero esta diferencia será fundamental.

Al tener una masa ligeramente superior, puede desintegrarse en un protón y, para compensar las leyes de conservación, en un electrón, que necesariamente debe ir acompañado por un neutrino. Se trata de una desintegración débil típica con emisión de electrones, similar a la que tanto intrigó a Enrico Fermi. Esta desintegración no se produce si los neutrones están empaquetados en los núcleos. En el campo de la fuerza fuerte que mantiene unidos los núcleos, el neutrón no puede descomponerse, pero si no puede contar con este escudo protector, se vuelve inestable y se desintegra al cabo de unos minutos. Veremos en seguida la importancia del papel de este mecanismo en la formación de los primeros núcleos.

Los protones y los neutrones se forman continuamente, junto con sus correspondientes antipartículas. Cuando los dos opuestos se encuentran, se aniquilan inmediatamente en fotones, pero el entorno es tan cálido que se siguen extrayendo parejas de partículas/antipartículas del vacío para reemplazar las que acaban de desvanecerse. El proceso se reproduce por doquier y de manera continua, mientras la temperatura lo consiente. En este rapidísimo ciclo de nacimiento y muerte, se amplifica esa pequeña asimetría inicial entre materia y antimateria. Lenta pero inexorablemente, esa infinitesimal diferencia de población hace que todos los antiprotones y los

antineutrones desaparezcan de las generaciones sucesivas: el universo se encamina a estar compuesto solo de materia.

Más tarde la temperatura cae por debajo del valor mínimo que permite extraer del vacío parejas de protones o de neutrones y el proceso se interrumpe marcando el fin de la era de los hadrones. Sin embargo, habrá aún la suficiente energía como para producir parejas de electrones/positrones que empezarán a poblar el universo protagonizando de nuevo una historia análoga a la que han vivido los hadrones.

A diferencia de los protones y los neutrones, los electrones son muy ligeros. De hecho, pesan casi dos mil veces menos que los tripletes de quarks a los que les gustaría acompañar. No son objetos compuestos y no hay partículas con carga más ligeras que ellos. Combinando la conservación de energía —según lo cual un objeto solo puede descomponerse en una partícula más ligera— con la de la carga —según la cual un electrón no puede descomponerse en partículas neutras—, hemos de concluir que los electrones también deben ser estables.

Cuando han pasado apenas unos instantes desde el Big Bang, el universo se llena también de las partículas cargadas más ligeras. A estas alturas contiene todos los ingredientes esenciales para que se forme la materia estable, pero aún hemos de tener un poco de paciencia.

## LOS MÁS TÍMIDOS Y AMABLES SON LOS PRIMEROS EN DEJARNOS

Desde que el universo se ha llenado de protones y neutrones, la población de neutrinos también ha aumentado. Son los más ligeros entre los leptones, tienen masas tan insignificantes que nos han tenido engañados hace pocos años. De hecho, solo recientemente se descubrió que su masa es ligeramente distinta de cero, aunque todavía no hayamos podido medirla con precisión. Son leptones, por lo que no sienten la fuerza fuerte, y son neutros, indiferentes a la interacción electromagnética, por lo tanto. La única fuerza a la que obedecen es la fuerza débil. Esto los hace poco intrusivos y exquisitamente amables. Los neutrinos son partículas muy reservadas, que se mueven con mucha delicadeza, de manera que logran atravesar enormes cantidades de materia sin ser notados o producir la menor molestia. Y sin embargo desempeñan un papel fundamental en los equilibrios que determinarán la composición material del universo.



Como hemos visto, los neutrones son ligeramente más pesados que los protones; ese 0,14 por ciento es una bagatela, como si entre dos individuos de ochenta kilos se diera importancia a una diferencia de peso de cien gramos. Con todo, si los protones y los neutrones deben mantener un equilibrio térmico entre sí, deben absorber la mitad de cada energía cada uno. Debido a la diferencia de masa, la población de neutrones será ligeramente inferior a la de protones. Mientras la temperatura sea enorme, este pequeño detalle es despreciable. Pero a medida que la energía térmica que se ha de distribuir disminuye, esta diferencia se vuelve cada vez más significativa. ¿Y quién se encarga de reducir la población de neutrones y aumentar la de los protones? Las reacciones que hacen que los neutrones desaparezcan, como la descomposición débil, la que los transforma en un protón, un electrón y un neutrino, y otras que tienen efectos semejantes. Conclusión: el gas de neutrinos que participa en estos procesos acaba por compartir la misma temperatura de la población de fotones y del material hadrónico con el que interactúa.

Este proceso dinámico se interrumpe en el instante  $t=1$  segundo. En este punto, la temperatura ha bajado tanto que para mantener el equilibrio térmico hay ya seis protones por cada neutrón, y los acontecimientos están a punto de precipitarse. La temperatura desciende de forma tan rápida que los neutrinos ya no logran mantener el nivel de reacción necesario para distribuir la energía térmica entre protones y neutrones. Hasta un momento antes, las diferentes especies de partículas se mantenían en equilibrio. La derrota es contundente: perdida irremediablemente la batalla, los neutrinos abandonan el campo. Una enorme población de partículas delicadas y amables se desprende de la materia primordial y comienza a vagar sin rumbo, llevando consigo tan solo el recuerdo de la temperatura que compartían con todos sus demás socios, un instante antes de que se produjera la separación.

A partir de este momento, en un universo ahora demasiado rarefacto para retenerlos, los neutrinos escapan del control de la materia agregada y ya no serán capaces de restablecer aquel abrazo primordial. Vagarán indefinidamente, durante miles de millones de años, asistiendo a la formación de estrellas y galaxias, enormes distribuciones de materia que seguirán atravesando con su habitual delicadeza y sin ser notados.

Su historia evolutiva será diferente, pero conservarán para siempre, codificada de forma indeleble en su temperatura, el recuerdo de la edad de oro; esa época enormemente cálida y mágica en la que ellos también jugaban al escondite con la materia y se emparejaban libremente con una multitud de partículas. Hoy, al cabo de 13 800 millones de años, los ancianísimos neutrinos cosmológicos —como se denominan para distinguirlos de esos otros, mucho más jóvenes, producidos por las estrellas— aún continúan vagando por todas partes. Según nuestros cálculos, cada centímetro cúbico del

universo debería contener seiscientos de ellos, lo que parece un número alto, pero los neutrinos interactúan tan débilmente con la materia que nadie ha logrado hasta ahora reunir pruebas de su existencia. Y, sin embargo, estamos seguros de que todavía están aquí, a nuestro alrededor; también tenemos una idea de su temperatura que, a causa de la expansión del universo, debería estar ahora alrededor de 1,95 grados Kelvin.

Por el momento, la búsqueda de signos de los neutrinos cosmológicos no ha dado resultados significativos. Hasta ahora solo se han encontrado indicios de su presencia. El día en el que alguna técnica nueva permita revelarlos podrían estudiarse todas las características del fondo cósmico de neutrinos, teorizado por todos los modelos de Big Bang. Este mar de partículas tímidas y amables que aún nos rodean esconde secretos decisivos para comprender lo que realmente sucedió cuando el universo apagó la vela de su primer segundo de vida.

## FORMARÁN EL CORAZÓN DE LAS ESTRELLAS

Al sonar el primer minuto hay ya siete protones por cada neutrón y la densidad de energía ha caído hasta el extremo de que pueden empezar a agregarse entre sí y a formar los núcleos de los elementos más ligeros.

Estamos ante un momento fundamental, porque la densidad y la temperatura del universo se parecen en este instante a las de las estrellas. Protones y neutrones, involucrados en choques intensamente energéticos, pueden reaccionar y formar un estado unido por la fuerza fuerte. Cuando un protón se fusiona con un neutrón, se convierte en un núcleo de deuterio; si dos núcleos de deuterio se fusionan, nacen los primeros núcleos de helio. El elemento ligero, cuyo núcleo está formado por dos protones y dos neutrones, toma su nombre del dios griego del Sol, y, en efecto, todo el hidrógeno que alimenta el inmenso horno nuclear de las estrellas acaba por transformarse en helio.

Para formar su núcleo, deben fusionarse dos núcleos de deuterio, un proceso que se produce con gran facilidad; el núcleo de cuatro es altamente estable porque implica una energía de enlace muy alta para cada componente del núcleo. Todos los neutrones libres residuales se verán involucrados en estas cuadrillas y desaparecerá del juego. Por esta razón, los núcleos de helio en masa constituirán aproximadamente el 24 por ciento del total. El resto, alrededor del 75 por ciento, está formado por protones que permanecerán

«solteros», listos para convertirse en átomos de hidrógeno tan pronto como las condiciones lo permitan; aquí y allá, en vestigios, solo aparecerán núcleos más pesados, como el litio y el berilio.

Solo habrá tres minutos para que se formen todos los núcleos primordiales del universo. Después de ese momento, la temperatura y la densidad ya no podrán soportar las reacciones nucleares. Y será una bendición, porque, de haber continuado el proceso demasiado tiempo, el universo habría consumido una gran cantidad de protones libres para construir núcleos más pesados. Aunque solo hubiera durado diez minutos, habría desaparecido casi todo el hidrógeno.

La abundancia de helio en el universo es otra confirmación de la teoría del Big Bang. Este elemento también se produce en el corazón de las estrellas, pero sin el helio primordial las cuentas no cuadrarían. Ni siquiera con todas las estrellas del universo quemando hidrógeno durante catorce mil millones de años se podría producir la abundancia de helio que se ha medido.

Los núcleos que se crearon entonces no volverán a modificarse durante miles de millones de años, y aún hoy constituyen la mayor parte de los núcleos existentes en el universo. A ellos se añadirán, mucho más tarde, los núcleos de los elementos pesados de la tabla periódica, que nacerán dentro de los inmensos hornos nucleares de las estrellas más masivas.

Los cálculos teóricos han estimado que, si la diferencia de masa entre el protón y el neutrón hubiera sido solo un poco más alta, ello habría tenido consecuencias desastrosas. Una nimiedad, el aleteo de una mariposa y se habrían producido una secuencia de catástrofes. La diferencia de masa habría cambiado significativamente la proporción entre protones y neutrones y hubiéramos tenido mucho más helio y mucho menos hidrógeno. En pocas palabras, no habría habido el suficiente hidrógeno para desencadenar reacciones nucleares en las primeras estrellas. Todo habría quedado envuelto, para siempre, en las más oscuras tinieblas; el universo se habría convertido en un espacio inmenso, triste y oscuro; sin estrellas, no habría elementos pesados y faltaría la materia prima para organizar planetas rocosos; no se habrían dado las condiciones necesarias para el desarrollo de formas de vida elementales ni, más tarde, las de alguien que, un día, pudiera contemplar su grandeza.

Pero todo esto, afortunadamente, no ocurrió en nuestro universo. El equilibrista avanza por el alambre, parece que va a caerse de un momento a otro, a un lado o a otro, mientras el público contiene el aliento por temor a la inminente tragedia, y en cambio, con elegancia y ligereza, recupera una y otra vez su equilibrio y concluye su espectáculo entre aplausos.

Pasará mucho tiempo antes de que la energía descienda lo suficiente como para permitir la formación de los primeros átomos de hidrógeno. Tendremos que esperar el momento en el que la temperatura del universo sea lo suficientemente baja como para no permitir que se rompa el enlace

electromagnético que permita a los electrones orbitar alrededor de los protones del núcleo. Pero se han hecho progresos muy importantes cuando se cierra el tercer día, y solo han pasado tres minutos desde el comienzo de esta gran aventura.

## Día 4

### Y por fin se hizo la luz

Una vez transcurridos los primeros minutos se produce un cambio de ritmo, brutal y totalmente inesperado. La secuencia paroxística de las transformaciones por las que el universo ha pasado se aplaca abruptamente y todo se ralentiza casi hasta el punto de perderse, en un proceso tan lento que parece agotador. Acabamos de recuperarnos del *crescendo in prestissimo* con el que se ha abierto la sinfonía y estamos esperando el tránsito hacia un tempo más regular y tranquilizador, cuando todo se desploma en un *larghissimo* que parece no conducir a nada.

Los procesos son ahora infinitamente más lentos y las eras se alargan desmesuradamente. Asistir a las transformaciones más importantes requerirá mucha paciencia. Después de la formación de los núcleos de los elementos más ligeros, durante cientos de miles de años no ocurre nada importante. Excepto que todo continúa expandiéndose y enfriándose.

Durante un tiempo que parece interminable, una niebla oscura llena el universo: un mundo opaco, compuesto de partículas elementales y núcleos, todos mezclados e inmersos en un mar de fotones y electrones. Partículas desconocidas de materia oscura participan clandestinamente en la zarabanda que parece no tener fin. No hay estructura, no hay jerarquía, no hay organización. Nada de nada.

Ni un solo rayo de luz es capaz de penetrar en ese plasma tenebroso e inquietante. Electrones y fotones se persiguen unos a otros, jugando a atraparse entre sí. Continuamente absorbidos para ser emitidos inmediatamente después por el denso gas de electrones que penetra en todas partes, los fotones son incapaces de liberarse de ese abrazo sofocante.

El opaco reino de las tinieblas perdurará cientos de miles de años. Ninguna ambientación *gótica* puede resistir la comparación. Ni siquiera las historias de ciencia ficción más imaginativas pueden competir con la atmósfera sombría de ese entorno gigantesco, oscuro y desesperante.

La clave de la transformación proviene, como siempre, de la temperatura, que cae irremediablemente con el aumento de la expansión. Todo cambia cuando el universo se acerca a los 3000 grados. Es aproximadamente la mitad del valor que puede medirse en la superficie del Sol y, en este momento, la niebla opaca empieza a despejarse. A medida que la temperatura baja, disminuye la energía cinética de los electrones, que ya no consiguen romper sus enlaces con los protones. La atracción electromagnética prevalece, y de esta manera una infinidad de electrones que vagaban por doquier, libres y salvajes, quedan domesticados por el campo electromagnético. Ya no serán libres, sino se verán forzados a orbitar permanentemente alrededor de un núcleo cargado.

Se forman los primeros átomos, de hidrógeno y helio principalmente. Nacen por todas partes, el plasma se descompone en cantidades monstruosas de gas que absorbe implacable todos los núcleos y toda la población de electrones. La materia comienza a adquirir una forma neutra y estable. Como novedad del momento, los átomos permitirán construir estructuras cada vez más complicadas, que darán paso a nuevas transformaciones.

Mientras los electrones se resignan al fin de su libertad, atrapados como quedan en las cómodas conchas de los orbitales atómicos, para los fotones llega el fin de una larga esclavitud. Liberados de repente del enlace con la materia, ahora pueden correr libremente y celebrar esta novedad llevando la luz a todas partes. De repente, el universo se vuelve transparente y un inmenso resplandor lo recorre.

Desde entonces, los fotones corretean libremente sobre todas las cosas. Con el tiempo se volverán cada vez menos energéticos, y su frecuencia disminuirá, señal inequívoca de debilidad. Sumergidos en un baño térmico cada vez más gélido, continuarán fluctuando de forma cada vez más tenue, llevando consigo, sin embargo, el recuerdo imborrable de la época en la que la radiación dominaba el mundo y la materia organizada en átomos aún no existía.

En definitiva, la luz, por fin, se hizo. Tal como reza la Biblia, pero no sucedió de inmediato y no resultó fácil en absoluto. Acaba de terminar el cuarto día y han pasado trescientos ochenta mil años.

## UN MUNDO SIN LUZ Y POBLADO POR ENTIDADES OSCURAS

Después del período de escasos minutos en el que se forman los núcleos, durante miles de años no ocurre nada relevante. La expansión y el enfriamiento del universo prosiguen sin pausa; sus dimensiones no tardan en superar los mil años luz y siguen creciendo, mientras que la temperatura aún se mide en millones de grados. Un objeto enorme, ardiente y oscuro. Un mundo infernal, sin luz y poblado por entidades oscuras.

Una especie de niebla opaca e impalpable lo llena y lo envuelve. Un aerosol de electrones, fotones y otras partículas elementales rodea los protones y núcleos de helio así como los raros elementos ligeros que se han formado.

La temperatura sigue siendo demasiado alta para que la materia puede agregarse por atracción electromagnética. Protones y núcleos de helio, cargados positivamente, intentan unirse a los electrones que revolotean alrededor, pero sin éxito. La agitación térmica hace que los electrones sean tan energéticos que, aunque se formara el enlace, se rompería en una fracción de segundo. La fuerza de atracción es demasiado débil para competir con la furibunda energía cinética que los lleva lejos. Hará falta paciencia y esperar a que la temperatura baje drásticamente antes de celebrar el gran triunfo de los enlaces electromagnéticos.

Todas las partículas materiales viajan sumergidas en un baño de fotones que comparten la temperatura del sistema, pero no hay rastro de luz. La densidad de la extraña niebla que envuelve el universo es tan alta que todo fotón se ve continuamente absorbido e inmediatamente emitido de nuevo.

El abrazo de los fotones con la materia, y sobre todo con los electrones, es sofocante y no les consiente libertad alguna; su trayectoria libre media cubre distancias infinitesimales. Cada vez que son emitidos por un electrón que entra en colisión, o se acelera, parten con la esperanza de cubrir largas distancias y correr hacia el infinito, pero vienen engullidos de inmediato por otra cosa sin tener siquiera tiempo para reflexionar sobre su triste destino, y el ciclo infinito de emisión y absorción vuelve a empezar de nuevo.

En la oscuridad de este extraño mundo se ocultan formas de materia aún más misteriosas. Hemos hablado poco hasta ahora de ellas porque no sabemos de qué se trata exactamente. Se hace difícil, por lo tanto, ubicarlas de forma precisa en la secuencia de acaecimientos que nos han traído hasta aquí. Pero en la era tenebrosa de la opacidad ya se encuentra presente en el universo un notable componente de materia oscura.

La hipótesis de que el universo contiene grandes cantidades de materia no luminosa fue planteada por primera vez, en 1933, por Fritz Zwicky, un astrofísico suizo con gran talento y dotado de un desmitificador sentido del humor. Se dice que, cuando otros científicos se mostraban escépticos con sus teorías, los insultaba llamándolos «bastardos esféricos». Ante la sorpresa de

du interlocutor, Zwicky le explicaba que seguía siendo un bastardo por dondequiera que se le observara.

Trabajando sobre el Cúmulo de Coma, una aglomeración que hoy sabemos que contiene más de mil galaxias, Zwicky notó que había algo que no cuadraba en las velocidades de las más cercanas al borde del cúmulo. Su movimiento no podría explicarse con la distribución de la masa visible obtenida de la luz. Los efectos de la gravedad no bastaban para explicar la rapidez de las órbitas de las galaxias exteriores. Todo se comportaba como si el volumen del cúmulo ocultara mucha más materia. Zwicky calculó que se necesitaba una masa muy superior, a la que llamó materia oscura porque no emitía luz, que permanecía oculta en la oscuridad del cosmos. Durante mucho tiempo esta teoría suya fue ásperamente discutida y el número de «bastardos esféricos» no mostraba signos de disminución.

La situación sufrió un vuelco gracias al trabajo de Vera Rubin, una astrónoma estadounidense, heredera de esa Henrietta Leavitt que había inventado el método de las Cefeidas para medir grandes distancias. Rubin fue una de las pocas astrónomas que, a la altura de los años sesenta, tenían acceso a los grandes telescopios. Debe recordarse que, cuando empezó a trabajar en el del Monte Palomar, tuvo que montarse por su cuenta un baño para mujeres, porque los constructores del observatorio más moderno del mundo no habían previsto que ninguna astrónoma pudiera trabajar allí.

Rubin midió, de forma muy sistemática, la velocidad de rotación de las estrellas en las galaxias espirales. Comenzó con Andrómeda y pudo constatar que el material más periférico orbitaba a una velocidad comparable a la de las estrellas internas: lo contrario a lo esperado, dada que la atracción gravitacional producida solo por la materia luminosa habría implicado una velocidad mucho menor. Se efectuaron observaciones análogas para el movimiento de galaxias enteras en el interior de los cúmulos y la conclusión resultó inevitable: el extravagante Zwicky tenía razón. Los cálculos de Rubin demostraron que la materia oscura tenía que ser cinco veces más abundante que la luminosa por lo menos. Las galaxias espirales debían estar inmersas en un halo gigantesco de materia completamente desconocida, sin el cual se habrían desintegrado desde tiempos inmemoriales.

En la segunda mitad del siglo xx, las evidencias experimentales de la presencia de materia oscura serán cada vez más numerosas. Diferentes métodos de investigación conducirán al mismo resultado: se obtendrá una evidencia indirecta de la materia oscura cuando se consiga medir las velocidades de rotación en la inmensa nube de hidrógeno que rodea muchas galaxias, y también cuando se multipliquen las observaciones basadas en el uso de lentes gravitacionales. Este fenómeno también había sido predicho por Zwicky, quien lo describió como una consecuencia necesaria de la relatividad general. El fantasioso astrónomo suizo comprendió antes que nadie que una



fuerte concentración de masa podría haber deformar el espacio-tiempo hasta el extremo de crear los mismos efectos ópticos que una lente. Los rayos de luz que cruzaran el área deformada, al ser desviados, podían producir adulteraciones increíbles. La misma estrella o la misma galaxia podría aparecer dos, tres, cuatro veces en la imagen recogida por el telescopio.

Estos fantasmas, estas imágenes desdobladas que podían hacer pensar que alguien ha bebido demasiado y lo ve todo doble de repente, serán en realidad nuevos instrumentos de medición que nos permitirán ver formas de materia que de otra manera permanecerían invisibles. Y estas confirmarán también la abundancia de materia oscura en el universo.

A pesar de las confirmaciones experimentales cada vez más convincentes, y a pesar de que nadie se atrevió a cuestionar la relevancia de su descubrimiento, el comité del Nobel, por razones absolutamente incomprensibles, nunca le asignó a Vera Rubin el premio que se merecía.

Hoy sabemos que aproximadamente una cuarta parte del universo está hecha de materia oscura, pero nadie sabe exactamente aún en qué consiste.

Ha habido quien ha planteado de la hipótesis de que podría ser un gas de neutrinos, pero al ser estos demasiado ligeros, los efectos gravitacionales observados no pueden explicarse. Si las teorías supersimétricas fueran correctas, habría familias enteras de partículas nuevas, muy pesadas y de extraños nombres que podrían explicar la materia oscura. Pero dado que no se ha descubierto hasta ahora ninguna partícula supersimétrica, la hipótesis de que el halo que rodea las galaxias esté formado por gravitinos o neutralinos resulta completamente arbitraria por ahora.

La búsqueda de todo tipo de partículas pesadas y de débil interacción que puedan explicar el arcano está aún en curso. Se plantean experimentos cada vez más sofisticados en grandes laboratorios subterráneos, se envían aparatos en órbitas alrededor de la Tierra o se buscan nuevas partículas en los aceleradores más potentes, pero sin resultados hasta ahora.

Algunos piensan que, en lugar de buscar objetos pesados, la atención debería concentrarse en partículas neutras y ultraligeras, llamadas *axiones*. El nombre fue acuñado por el ganador del Premio Nobel Frank Wilczek, quien lo tomó prestado de un famoso detergente de los años cincuenta, con la idea de que la nueva partícula aclararía definitivamente la cuestión. Los axiones, supuestamente, son corpúsculos evanescentes, extremadamente ligeros, hipotetizados para explicar pequeñas anomalías en la descomposición de las partículas conocidas y que podrían interactuar con la materia ordinaria casi exclusivamente a través de la gravedad. Pero tampoco para esta hipótesis disponemos hasta este momento de confirmación y la búsqueda continúa.

Cualquiera sea la solución del rompecabezas, la materia oscura entró sin duda alguna en liza en alguna de las fases anteriores, quizá inmediatamente después de la fase inflacionaria. Al enfriarse como todo lo demás, comenzó a

mostrar minúsculas diferencias de temperatura en su distribución de energía, al principio perfectamente homogénea. Estas diferencias nacen de las fluctuaciones cuánticas primordiales magnificadas por la expansión inflacionaria y de la interacción con el turbulento mar de fotones que se agita por todas partes.

Ahora, en la era de la opacidad, nos la imaginamos como una suerte de fina red; una negra, tenue pero tupidísima telaraña que se mezcla y lo envuelve todo. Su distribución espacial no desempeña por ahora un papel relevante en la dinámica de este plasma oscuro, pero no tardará en activarse un mecanismo de concentración que hará que la materia se espese allá donde haya minúsculas fluctuaciones de energía. Los nudos más densos de esta sutil red serán la urdimbre sobre la que nuestro mundo material empezará a espesarse. Allí nacerán las primeras estrellas y florecerán las semillas de las galaxias.

## LLEGA LA HORA DE LA MATERIA

El tenebroso reino de la opacidad duró tanto que casi parecía que nada podía trastocar su equilibrio.

Pero cuando la temperatura cayó por debajo de los 3000 grados, sucedió lo irreparable. Ese valor marcaba un límite, más allá del cual iba a activarse una secuencia de fenómenos irreversibles y concatenados entre sí. Han pasado ya cientos de miles de años desde el Big Bang y hasta este momento los componentes de la materia han permanecido totalmente inmersos en el mar de fotones de la radiación, compartiendo su temperatura. El equilibrio térmico quedaba garantizado por las continuas interacciones entre los dos, que se vuelven frenéticas a causa de la alta densidad. Con la expansión, sin embargo, se llega a un punto en el que las cosas cambian de repente.

Todo tiene que ver con una diferencia de comportamiento entre radiación y materia que vale la pena remarcar. La expansión del universo hace que el volumen crezca con el cubo del radio: al igual que un globo cuando se hincha, un radio doble corresponde a un volumen ocho veces mayor. La densidad de la materia y de energía disminuye por lo tanto con el aumento del volumen, en proporción inversa al cubo del radio. En el caso de los fotones de radiación, sin embargo, entra en juego un mecanismo adicional que reduce ulteriormente su densidad. Al estirarse el espacio, la longitud de onda aumenta, de modo que la energía disminuye. En pocas palabras, la densidad

de energía causada por la radiación disminuye más rápidamente que la densidad de energía causada por la materia. Al duplicarse el radio, la energía de la radiación disminuye dieciséis veces, mientras que la debida a la materia se reduce solo ocho veces.

A la larga, el equilibrio se rompe de manera catastrófica. Esto ocurrió trescientos ochenta mil años después del Big Bang. En ese momento, la radiación se separa de la materia y sus destinos seguirán caminos completamente diferentes. La densidad de los fotones disminuirá hasta el extremo de que las interacciones con los electrones y los protones se espaciarán y se romperá el equilibrio térmico. Comienza así un largo declive que provocará que la radiación, que ha dominado el mundo hasta ese momento, vaya adquiriendo un peso y una importancia cada vez menor, hasta convertirse en un componente irrelevante de la masa total del universo.

A no mucho tardar, la temperatura caerá hasta el punto de que la energía potencial del enlace electromagnético entre electrones y protones superará la energía cinética de la agitación térmica. Los electrones podrán unirse entonces a los protones y nacerán los primeros átomos, especialmente de hidrógeno y helio, y después litio, berilio y algún otro componente ligero. Liberados de las interacciones continuas con los fotones, los átomos encontrarán su estabilidad.

De la nueva organización nace materia neutra, que interactuará cada vez menos con la radiación, por lo tanto. Una inmensa y enrarecida nube de hidrógeno y de helio ocupará el universo entero y será su evolución la que determine el resto de la historia. Al cabo de milenios en los que el universo ha estado dominado por la radiación, la traumática escisión marca el comienzo de la era de la materia. La nueva época conducirá a la formación de galaxias, estrellas y planetas hasta llegar al desarrollo de formas materiales complejas como los organismos vivos. Se establece un nuevo dominio, un reino que durará miles de millones de años y cuyo final, hoy en día, no vislumbramos.

En cuanto a los fotones, desatados definitivamente los vínculos que los encarcelaban, liberados de ese abrazo que parecía inextricable, pueden viajar libres por fin por todas partes. El mar de fotones se retira de la materia, pero ocupa todo espacio que dejan libre los átomos recién formados, llevándose consigo una nueva forma de energía. El universo se vuelve transparente, permitiendo que la luz lo atravesase de lado a lado. Es un resplandor distinto a la luz blanca a la que estamos acostumbrados; nuestros ojos, si estuviéramos allí por absurdo que parezca para asistir al fenómeno, verían una especie de rayo rojizo. Es una luz cálida que va más allá del rojo oscuro que marca el límite superior de las longitudes de onda visibles para los humanos. Curiosamente, se parece mucho a la que usamos al activar el mando a distancia del televisor para cambiar de canal. Pero no hay duda: es luz, el universo es transparente y la luz lo recorre.

## LOS MENSAJES SECRETOS ESCONDIDOS EN EL MURO

Dos veces al año, en el Muro de las Lamentaciones de Jerusalén, el lugar más sagrado para la religión judía, se retiran todas las notitas que los fieles, según una antigua costumbre, insertan en los intersticios entre las piedras. Empleando unas pequeñas herramientas, un grupo de empleados extrae cuidadosa y delicadamente las hojitas de papel apiñadas en las pequeñas grietas, para dar cabida a las que las reemplazarán en los siguientes meses. Las notas no se tiran, sino que se entierran en el cementerio judío de Monte de los Olivos, una pequeña colina no muy lejos de la Ciudad Vieja.

El Muro occidental, como se denomina en hebreo, es un muro construido por Herodes el Grande, rey de Judea, durante la ocupación romana. Las obras comenzaron en el 19 a.C. y terminaron en 64 a.C., con el objetivo de consolidar la colina sobre la que se erigía el Segundo Templo, el lugar más sagrado para la religión judía. En 70 d.C. las tropas de Tito profanaron el lugar sagrado y destruyeron completamente el templo, que nunca fue reconstruido. Fue el final de un mundo, el apocalipsis. El único resto del edificio original fue el muro de contención construido por Herodes que, desde entonces, es adorado por todos los judíos como un lugar de oración y, al mismo tiempo, como recordatorio del acontecimiento más traumático y doloroso de su historia.

Al muro, durante siglos, la gente iba a llorar y a rezar, recordando la terrible desgracia que llevó a la diáspora de ese antiguo pueblo. Fueron los habitantes de Jerusalén los que empezaron a llamarlo *el muro de las lágrimas*, porque los peregrinos no eran capaces de refrenar el dolor y la emoción que sentían al tocar las antiguas piedras, sobre las cuales descansaban las palmas de sus manos y las frentes para rezar.

A partir de la Edad Media se convirtió en práctica habitual que los peregrinos dejaran signos de su visita, incisiones, pintadas o incluso la huella de sus manos mojadas en cal. Con el transcurso del tiempo estos hábitos, con los que se corría el riesgo de deteriorar irreparablemente las piedras antiguas, fueron prohibidas y se impuso la costumbre de dejar pequeños pedazos de papel en los intersticios. La tradición ha continuado hasta nuestros días, pero los visitantes son ya tantos a estas alturas que, periódicamente, es necesario limpiar las pequeñas cavidades, para hacer sitio a las notas que depositarán los visitantes posteriores. Estas notas contienen oraciones o solicitudes de ayuda. Son invocaciones muy personales, que esconden a menudo sufrimientos y secretos de las familias o de quienes las depositan allí. En esas pequeñas grietas, se acumulan y se esconden esperanzas y dolores de innumerables generaciones de fieles.

Algo así sucede en otro tipo de muro, mucho menos material y más impalpable desde luego que el Muro de las Lamentaciones, pero también enormemente más antiguo. Estamos hablando del muro de radiación cósmica de fondo.

La luz que se separa de la materia en una época tan lejana ha mantenido, durante miles de millones de años, el recuerdo de esa traumática experiencia. Los fotones primordiales, los primeros que experimentaron la embriaguez de la libertad, siguen todavía a nuestro alrededor y llenan el cosmos procedentes de todas direcciones. Con el paso del tiempo su temperatura se ha desplomado desde los 3000 hasta poco menos de tres grados; desde entonces, el universo ha aumentado sus dimensiones más de mil veces y el estiramiento del espacio-tiempo ha dilatado enormemente su longitud de onda. Ahora ya no oscilan en las frecuencias infrarrojas, su canto se ha vuelto mucho más grave, casi inaudible, y han acabado en la región de las microondas. Sí, es prácticamente la misma radiación que usamos en la cocina para descongelar algo. Y es que, en efecto, todo el universo, al no poder intercambiar energía con ningún otro sistema se comporta como un gigantesco horno de microondas, un enorme cuerpo negro que sigue las mismas leyes.

Lo maravilloso es que, en el mar de fotones de la radiación cósmica de fondo, han quedado impresos los signos indelebles de esa época, como los fósiles que hallamos dentro de algunas rocas. El último contacto con la materia, un instante antes de la escisión, dejó huellas inequívocas, que fueron atenuándose gradualmente pero que aún nos permiten obtener información valiosa, consintiéndonos volver a la época en la que materia y radiación iban cogidos del brazo o, mejor dicho, mucho más atrás aún.

El sueño de todo científico sería el de poder retroceder tanto en el tiempo como para asistir en vivo, mirando a través de un telescopio, al nacimiento del universo, al Big Bang. Usando la luz, los fotones de radiación electromagnética, este sueño se vuelve imposible porque, habiendo alcanzado los trescientos ochenta mil años después del comienzo, existe esta suerte de muro, una barrera infranqueable que no nos permite ver directamente lo que sucedió antes. Pero al igual que sucede en el caso del Muro de las Lamentaciones, en las pequeñas grietas de este muro, en esos finos intersticios que se entrecruzan justo detrás de la aparente compacidad, hay información preciosa. Midiéndola e interpretándola, los científicos han logrado sonsacar los secretos del instante en el que comenzó el predominio de la materia y, junto con estos secretos, han recopilado información de valor inestimable sobre todo lo que sucedió antes, llegando incluso a rozar el momento de la primera gran transformación, la que quedó marcada por la inflación cósmica.

## UN RELATO MUY DETALLADO

La radiación cósmica de fondo de microondas (CMB, por sus siglas en inglés) es nuestra fuente de información más preciosa acerca del origen del universo y de sus transformaciones.

A partir del descubrimiento de Penzias y Wilson en 1964, una serie de experimentos cada vez más sofisticados han producido una impresionante cantidad de resultados. La CMB puede considerarse una especie de mina cuyos filones, extremadamente ricos, nos han proporcionado ya una enorme cantidad de datos. Pero aún queda mucho por excavar y sabemos que hay vetas ocultas, no explotadas hasta ahora, que contienen información muy valiosa.

Al reconstruir los fotones de baja energía que lo componen, procedentes de todas direcciones, es posible obtener una imagen completa de la bóveda celeste, de la cual puede extraerse una considerable mole de información.

Su primera característica es una extrema homogeneidad en la distribución de la temperatura. La CMB tiene un espectro de cuerpo negro ideal y la radiación es tan tenue que la temperatura del universo está a 2,72 grados por encima del cero absoluto. La hipótesis de que el universo se comporta como un inmenso horno ideal, perfectamente aislado, es correcta. Los fotones primordiales, que después de la separación de la materia siguieron enfriándose durante miles de millones de años, todavía recuerdan que estuvieron en equilibrio térmico con él durante trescientos ochenta mil años. El flujo de radiación es uniforme en todas las direcciones, pero hay áreas minúsculas caracterizadas por diminutas diferencias de temperatura que muestran una estructura muy característica.

Estas irregularidades o anisotropías en la distribución de temperatura se han estudiado en todos sus detalles, porque contienen información valiosa sobre lo que sucedió en los primeros instantes de la vida en el universo. Son como las notitas en las grietas del Muro de los Lamentos, que nos cuentan secretos e historias lejanas. Son la huella, que ha quedado en la radiación, de las fluctuaciones cuánticas que encrespaban la minúscula burbuja que emergió del vacío, antes de que la inflación la hinchara desmesuradamente. Esas porciones de espacio, una vez infinitesimal, se han expandido hasta dimensiones monstruosas y cubren el área de cúmulos enteros de galaxias. En el cielo psicodélico reconstruido por los experimentos más modernos, como el del satélite Planck que terminó su misión en 2013, se ve el reino de la mecánica cuántica expandido a escala de galaxias.

El viejo prejuicio según el cual la teoría de Planck y de Heisenberg solo puede explicar los fenómenos de lo infinitamente pequeño ha quedado

superado de forma definitiva por los datos observados. La radiación cósmica de fondo constituye un mapa claro y perfectamente legible de la densidad de la materia en el momento de la separación. Cada mínima diferencia local de temperatura puede atribuirse a una diferencia de densidad de la materia en el instante en que los fotones experimentaron la última difusión, un momento antes de separarse definitivamente. Nos permite observar la enorme telaraña cósmica alrededor de la cual se construyeron las primeras semillas de las galaxias.

Al analizar en detalle la distribución de las pequeñas faltas de homogeneidad y sus dimensiones, es posible obtener valiosa información sobre la geometría del universo.

Un universo cerrado o abierto deformaría de manera característica la imagen de objetos tan distantes, porque los fotones recorrerían trayectorias convergentes o divergentes. De las dimensiones y la distribución angular de estas desigualdades obtenemos una confirmación inequívoca de que nuestro universo es plano. Lo que implica que la densidad de la materia está muy próxima a la densidad crítica. El fondo de radiación cósmica, por lo tanto, nos da una ulterior confirmación de la presencia de materia y energía oscura en proporciones que hoy pueden ser establecidas con precisión. Los datos más recientes nos dicen que el universo está formado en un 68 por ciento de energía oscura, en un 27 por ciento de materia oscura y solo en un 5 por ciento de materia ordinaria.

Además, simulando los efectos de deformación de la imagen, a causa de la materia oscura que curva el espacio-tiempo, podemos reconstruir un mapa de su distribución. El efecto de la lente gravitacional nos consiente obtener, a partir de la radiación cósmica de fondo, una imagen tridimensional de la distribución de la materia oscura en el universo. Conocer en detalle cómo está organizada esta sutil telaraña cósmica nos permite comprender mejor los mecanismos que llevaron a la formación de las primeras estrellas y las primeras galaxias.

El análisis cuantitativo de la distribución de fluctuaciones de temperatura primordial en el fondo de radiación cósmica constituye una de las confirmaciones más sólidas de la inflación. Con todo, estamos a la espera de extraer pronto nuevos y más completos resultados de las mediciones de su polarización.

La polarización de una radiación indica si las ondas electromagnéticas vibran en una dirección preferencial. Se trata del mismo mecanismo que provocó el éxito de las gafas de sol Polaroid. Los reflejos del sol sobre la superficie del agua, por ejemplo, están compuestos por luz polarizada, es decir, el campo electromagnético del rayo reflejado oscila únicamente en el plano horizontal. Si se usa un filtro vertical, delgadas láminas que solo permiten el paso de las ondas que oscilan verticalmente, esos molestos

reflejos son absorbidos. Las lentes polarizadas son lentes de cristal o plástico en cuyo interior se amalgaman estos filtros verticales que absorben las reverberaciones responsables de la mayor parte del deslumbramiento y de las molestias visuales.

La radiación cósmica de fondo queda polarizada por su interacción con el medio material y, por lo tanto, acarrea consigo información adicional sobre la historia del cosmos. Esta característica nos dice algo más sobre el último contacto entre radiación y materia. Las formas de polarización lineal pueden estar relacionadas con la densidad de la materia, lo que nos proporciona ulteriores detalles, por ejemplo, sobre la distribución de la materia oscura en el momento de la separación.

Los experimentos más modernos han logrado medir esta polarización débil, obteniendo importantes resultados. La polarización más buscada, hasta ahora sin éxito, es de tipo turbulento y se la reputa producida por la interacción de los fotones con las ondas gravitacionales primordiales. Es un efecto aún más sutil, una polarización muy débil y además enmascarada por fenómenos similares producidos por el polvo intergaláctico. Una verdadera pesadilla para los físicos experimentales.

Si llega a conseguirse identificar la señal que dejó el último encuentro entre fotones y ondas gravitacionales, esta representará una huella inconfundible de la inflación. Esa extraña polarización, que hemos estado tratando de identificar durante décadas, podría ser la clave para abrir el cofre que aún guarda los muchos secretos de la fase inflacionaria. Permitiría, por ejemplo, determinar la escala de energía en la que se generaron las fluctuaciones iniciales en las primeras fracciones de segundo después del Big Bang.

Para comprender mejor la inflación, hay otras flechas en el carcaj de los científicos, que quizá puedan dar en el blanco. Para discriminar las diferentes variantes de los campos escalares que pueden haberlo desencadenado, se está pensando en observar con mayor precisión aún las estructuras a gran escala de las galaxias primordiales. Su distribución debe seguir el trazado de las pequeñas fluctuaciones del campo de inflatón que quedó grabado en el fondo cósmico de radiación de la expansión inflacionaria. Habría que recoger una muestra lo más amplia posible de galaxias primordiales, es decir, observar las galaxias más distantes cuando aún estaban en formación, y eso es lo que se propone hacer una nueva generación de experimentos que no tardarán en ser lanzados al espacio. Con la ayuda de los neutrinos cosmológicos y de las ondas gravitacionales fósiles, que tarde o temprano serán identificados, los secretos de la inflación podrían ser revelados muy pronto; y eso siempre que no se dé la sorpresa adicional de algún nuevo escalar en los datos del LHC.

A estas alturas, hemos llegado al final del cuarto día, han pasado trescientos ochenta mil años desde el Big Bang, y el universo está entrando en



una fase muy interesante: una cadena de transformaciones de las que nacerá la primera estrella. Una parte de la materia está a punto de organizarse en una nueva forma, dinámica y turbulenta, que iluminará el universo convirtiéndolo en un espectáculo maravilloso incluso para nuestros ojos, tan limitados en sensibilidad. De los enormes hornos que se encenderán en el corazón de las estrellas nacerán los elementos pesados destinados a producir otras formas de agregación, más pacíficas y menos turbulentas: los planetas. Allí se traducirán en rocas, aire, agua, plantas y animales, incluidos nosotros. Si empezamos a sentirnos complacidos por ser, literalmente, hijos de las estrellas, debemos aceptar también que somos bisnietos de esas fluctuaciones cuánticas, expandidas de la inflación, sin las cuales las primeras estrellas no habrían podido agregarse.

## Día 5

### Se enciende la primera estrella

La era de la materia acaba de comenzar y los ritmos de las transformaciones se ralentizan cada vez más. Hasta ahora la gravedad, la más débil entre todas las interacciones, se ha mantenido un poco apartada. Ahora su presencia empieza a dejarse notar, al principio de manera delicada, casi imperceptible, pero pronto conquistará con fuerza el centro del escenario.

Con el desacoplamiento entre materia y radiación, las cosas se han vuelto más claras. La radiación se ha distribuido uniformemente por todo el espacio disponible y el universo se ha vuelto transparente a la luz. Pero el resplandor que marcó la última metamorfosis ya se ha desvanecido, desde que la expansión alargó las longitudes de onda más allá del umbral de lo visible. El universo sigue lleno de radiación y todavía está muy caliente, pero se ha sumido de nuevo en la oscuridad total.

La materia se mueve lentamente, bajo la acción de la gravedad, y se ha estabilizado en átomos que forman una inmensa nube de hidrógeno y helio. Protegida por la oscuridad, una enorme telaraña de materia oscura, ya mucho más abundante que la materia ordinaria, envuelve el cosmos.

Las pequeñas anomalías en su densidad, hijas de las fluctuaciones cuánticas que preceden a la inflación, se han expandido desmedidamente y ahora, alrededor de estas zonas, algo está sucediendo. Si pudiéramos ver más allá del velo oscuro que lo oculta todo, asistiríamos a una lenta pero inexorable densificación de gas. En estas regiones irregulares, con contornos desflecados, hay una densidad ligeramente superior a la media y la fuerza gravitacional que de ella se deriva atrae más materia. Así se construyen aglomeraciones cada vez más imponentes y, mientras esto sucede, la distribución de la materia adquiere una simetría esférica cada vez más evidente.

El proceso es muy lento y requerirá cientos de millones de años. Pero por mucho que la velocidad con la que avanza sea casi imperceptible, el paso de

la gravedad no deja escapatoria: nadie podrá obstaculizar a partir de ahora su dominio del universo material que acaba de formarse.

Enormes concentraciones de gas se hacían alrededor de las irregularidades; aquí y allá empiezan a distinguirse cuerpos esféricos de enorme masa, cien veces más pesados que el Sol por lo menos.

La fuerza de gravedad que de ellos se genera es monstruosa: comprime el gas, empujándolo cada vez más violentamente hacia el centro del sistema, que se calienta e ioniza el hidrógeno. El inmenso cuerpo celeste está formado ahora por gas en las capas externas y por un plasma muy caliente en su núcleo más interno. La implacable mordaza de la gravedad hace que el material alcance decenas de millones de grados que desencadenan la fusión nuclear entre los núcleos de hidrógeno y sus isótopos. La reacción produce una inmensa cantidad de calor, que se extiende por todas partes en forma de una corriente imparable de fotones y neutrinos.

Un destello cegador de luz visible se enciende en la oscuridad más profunda. El universo todavía está envuelto en las tinieblas, pero la nueva luz acaba de comenzar a surcar las enormes distancias y pronto estará acompañado por una infinidad de otras fuentes de luz que se encenderán por doquier.

Ha nacido la primera estrella, cuando hemos llegado al quinto día y han pasado doscientos millones de años.

## POR EL CUAL SALIMOS / A CONTEMPLAR DE NUEVO LAS ESTRELLAS

No hay palabras más poderosas que las elegidas por Dante para cerrar los cánticos del *Infierno*. El endecasílabo final es un destilado de esa sensación de consuelo que la vista del cielo estrellado inspira en la humanidad, desde la noche de los tiempos. El mismo estado de ánimo que le sugerirá a Leopardi un íncipit igualmente fulminante: «Vagas estrellas de la Osa, no creí / volver, como solía, a contemplaros / resplandecer en el jardín paterno».

Después de haber cruzado los temores y los riesgos del mundo tenebroso del Averno, de la oscuridad que esconde la angustia y los tormentos de la carne, o en el culmen de una amarga reflexión sobre una existencia diferente de la que había imaginado, volver a ver las estrellas, inmóviles en el firmamento, aplaca las preocupaciones y sosiega. Con su aparente persistencia e inmutabilidad, el cielo estrellado nos protege del miedo a los

cambios y las catástrofes, y nos consuela, acariciando nuestro infantil deseo de estabilidad.

Y, sin embargo, si las observamos de cerca o indagamos en los mecanismos que agitan las capas más internas de estos maravillosos astros, nos hallaremos en presencia de procesos materiales de violencia exorbitante y será difícil encontrar sistemas más inestables y turbulentos.

Una estrella como nuestro Sol nos parece gigantesca, con un radio cien veces mayor que el de la Tierra que, en comparación, se convierte en un puntito insignificante. Sin embargo, es una enana amarilla, una estrella de tamaño entre mediano y pequeño, una de las muchas que abundan en nuestra galaxia. Nada que ver con los gigantes de la categoría, como la estrella mayor del sistema de Eta Carinae, un monstruo que tiene una masa casi cien veces mayor que la del Sol. Sin embargo, como veremos, en el mundo de las estrellas tener dimensiones reducidas tiene importantes ventajas evolutivas.

El Sol es una esfera casi perfecta de plasma incandescente, compuesta en su mayor parte de hidrógeno y helio, dotada de campo magnético y que gira sobre sí misma cada veinticinco días. La temperatura de la superficie se acerca a los 6000 grados, pero supera el millón de grados tan pronto como se penetra en los estratos interiores.

El origen de esta enorme cantidad de energía radica en los mecanismos que se agitan en el corazón de la gran bola de gas ionizado. La inmensa concentración de materia produce una atracción gravitacional gigantesca, que comprime los estratos de plasma; la temperatura crece cada vez más, a medida que nos acercamos a las capas más profundas; en el corazón de la estrella se superan los 15 millones de grados y en este entorno se desencadenan reacciones de fusión termonuclear.

Conseguir fusionar dos núcleos ligeros es un proceso que produce una enorme cantidad de energía. El estado vinculado final es más liviano que los dos núcleos de arranque y la diferencia de masa se transforma en la energía que se desarrolla a causa de la reacción.

El problema es que no resulta nada sencillo, por ejemplo, fundir dos protones o núcleos de hidrógeno. Al tener ambos carga positiva se repelen violentamente cuando se intenta ponerlos en contacto, es decir, a la distancia en la cual la fuerza de atracción fuerte podría prevalecer sobre la repulsión electromagnética. Solo puede conseguirse explotando las colisiones derivadas de condiciones extremas de temperatura y presión.

En el interior del Sol, bajo la presión de la inmensa fuerza de gravedad, estas condiciones se realizan o, mejor dicho, se acercan lo suficiente como para desencadenar el fenómeno. La mayor parte de los protones no participan en la fusión, excepto una fracción infinitesimal que, a causa de las fluctuaciones cuánticas, logra superar la barrera de potencial. El fenómeno afecta una masa de hidrógeno lo suficientemente elevada como para permitir

la producción de una imponente cantidad de energía, pero lo suficientemente pequeña, con todo, como para permitir que la estrella brille durante miles de millones de años.

En el corazón del Sol, los núcleos de hidrógeno y sus isótopos, deuterio y tritio, se funden para formar núcleos de helio. La energía liberada por las reacciones se presenta bajo forma de neutrinos y fotones de alta energía. Los primeros atraviesan sin problemas la enorme esfera incandescente y vuelan libres para llegar hasta los lugares más remotos del universo. A los fotones les encantaría hacer lo mismo, pero permanecen atrapados en una reclusión cuyo fin no se avista. Atravesando la materia ultradensa que los rodea, los fotones entran en colisión y se ven continuamente absorbidos y reemitidos por el material con el que se tropiezan en su camino. De esta manera su energía se reduce y se pierde su dirección inicial. Vagarán por este laberinto infernal durante millones de años porque el ciclo se repetirá infinitas veces antes de que puedan escapar de esa trampa. Hasta que un día, cuando ya hayan perdido toda esperanza emergerán, casi por casualidad, de la superficie y serán libres por fin. A partir de ese momento podrán recorrer distancias interminables: volarán lejos, a la velocidad de la luz, para calentar e iluminar todo lo que los rodea.

La reacción termonuclear mantiene en un equilibrio precario todo el sistema. En las profundidades del Sol se juega una partida desigual entre la gravedad y la fuerza fuerte. La más débil de las interacciones, cuyos efectos han sido ignorados durante mucho tiempo, se venga y obliga a la confrontación a la primera de la clase, esa interacción fuerte que la menospreciaba. Después de llamar a filas todo el hidrógeno que vagaba por los alrededores y reunirlo y organizarlo en la perfecta geometría esférica del Sol, sabe que es invencible y puede lanzar su grito de batalla.

Una terrible presión aplasta la materia y se afana por resquebrajarla en sus componentes elementales. Los protones confinados y forzados a fusionarse escapan momentáneamente a su destino; la enorme cantidad de calor que se libera con la formación de núcleos de helio tiende a hacer que el plasma se expanda y contrarreste la tenaza de la gravedad. Se crea una situación de equilibrio, intrínsecamente inestable, porque antes o después el hidrógeno se agotará, pero la batalla puede durar miles de millones de años.

El más turbulento de los escenarios, devastado por corrientes convectivas, grandes vórtices y gigantescos chorros de plasma, visto desde cierta distancia se nos muestra como una estrella benéfica y tranquilizadora, y todos los pueblos cantarán sus alabanzas como pilar del orden que sostiene el mundo.

Durante milenios desconoceremos la furibunda lucha que tiene lugar en su interior. Se trata de una batalla épica, pero con un resultado inevitable, porque ya se da por descontado el nombre del ganador y sabemos que el desplome de su adversario, cuando llegue la derrota, será desastroso.

El choque entre Zeus y los dioses del Olimpo contra los titanes dirigido por Cronos duró diez años. Con la ayuda de los rayos, la nueva arma forjada por los cíclopes, y las piedras que lanzan los hecatónquiros, gigantes de cien manos aliados suyos, Zeus derrotó a los Titanes y los arrojó a la profunda oscuridad del Tártaro. La lucha a muerte entre la gravedad y la fuerza nuclear fuerte, que tiene como campo de batalla el centro del Sol, durará mucho más. El hidrógeno disponible tardará diez mil millones de años en consumirse, pero cuando esto suceda, nada podrá contrarrestar la gravedad y se desencadenará la catástrofe.

## LA ERA ÉPICA DE LAS MEGAESTRELLAS

Las primeras estrellas que brillaron en el universo, doscientos millones de años después del Big Bang, eran astros muy particulares. Se cree que eran gigantescas, cien o doscientas veces más grandes que el Sol, y por esta razón se les llama *megaestrellas*. Se formaron en la profunda oscuridad de la edad oscura, y emplearon decenas de millones de años para reunir la inmensa cantidad de hidrógeno necesaria. La carrera para encontrar alguna que aún brille en los rincones más remotos del universo está en curso, pero hasta ahora no ha producido resultados.

Después de la recombinación, la materia ordinaria del universo ya está formada por átomos, de modo que es completamente neutra y aún sigue enfriándose. La gravedad la concentra lentamente alrededor de los nodos de densidad más elevada de la distribución de materia oscura que envuelve la enorme nube de gas. Las irregularidades se traducen en zonas de atracción gravitacional más intensa, que forman por lo tanto aglomeraciones cada vez más imponentes de materia.

Las megaestrellas primordiales no nacen de forma aislada, sino que se congregan en grupos más o menos numerosos, organizándose en grandes familias. Esta distribución espacial, localmente no homogénea, se reflejará en la posterior formación de galaxias.

Son muy diferentes de las estrellas actuales no solo por sus dimensiones, sino también porque están compuestas solo de hidrógeno y de helio. Las megaestrellas carecen completamente de elementos más pesados, simplemente porque estos no se han formado todavía. La síntesis de núcleos de carbono, nitrógeno y oxígeno —que serán componentes indispensables para el nacimiento y evolución de estructuras más complejas, como las

galaxias y los planetas— solo se producirá en las capas internas de estas nuevas estrellas.

En estrellas enanas, como el Sol, heredero de una larga cadena de generaciones de estrellas primordiales, estos elementos están presentes, pero no participan de forma significativa en los procesos nucleares, que están dominados por la cadena protón-protón. Por el contrario, las estrellas más masivas que el Sol, que alcanzan presiones internas y temperaturas muy superiores, pueden desencadenar otras reacciones nucleares de fusión, que utilizan elementos más pesados. En particular, a temperaturas lo suficientemente altas, los núcleos de carbono, nitrógeno y oxígeno puede actuar como catalizadores para la fusión del hidrógeno y aumentar su eficiencia. Este mismo proceso constituye un límite para el tamaño de las estrellas más masivas del universo actual. Para una masa superior aproximadamente ciento cincuenta veces a la del Sol, las reacciones nucleares vinculadas a la cadena carbono-nitrógeno-oxígeno se producirían a una velocidad tan elevada que llevaría rápidamente a la destrucción de la estructura estelar.

Sin embargo, este límite no se aplica a las megaestrellas: la velocidad de la mera cadena protón-protón permite construir monstruos que pueden superar incluso las trescientas masas solares. Con todo, cuanto mayor sea el tamaño de la estrella, más rápido es el uso de combustible. Para las estrellas vale la máxima «lo pequeño es hermoso», en el sentido de que hay ventajas considerables en ser de pequeño tamaño. El sol puede arder lentamente durante miles de millones de años, mientras que las supergigantes, que lo miran con condescendencia debido a su tamaño, tendrán una vida muy corta, que alcanzará como máximo un millón de años.

Los superestrellas, que comenzaron a brillar en el universo primordial doscientos millones de años después del Big Bang, son astros imponentes, extremadamente luminosos, pero de vida breve. Pusieron fin, con su luz, a la era de la oscuridad, a cambio de gozar solo de una existencia efímera, como las luciérnagas en primavera.

Las megaestrellas se suceden, de generación en generación, y cuando alcanzan el final de su existencia, explotan difundiendo por todo su alrededor las nuevas formas de materia que han forjado en sus inmensos crisoles nucleares. De esta manera, el universo se enriquece con elementos como el carbono, el oxígeno y el nitrógeno y, gradualmente otros, cada vez más pesados, que también modificarán las reacciones nucleares de generaciones de estrellas sucesivas. Las que utilizarán el material distribuido en el espacio por las megaestrellas serán más pequeñas y menos luminosas que sus gigantes ancestros, pero podrán vivir más y dar lugar a transformaciones complejas, que requieren en primer lugar una enorme cantidad de tiempo.

Al igual que los gigantescos animales del Jurásico, que dieron paso a los mamíferos más pequeños y ágiles, las megaestrellas se extinguieron en el curso de unos pocos cientos de millones de años para dar origen a nuevas generaciones de estrellas, más pequeñas pero más adaptadas para sobrevivir.

Recoger señales procedentes de esa época oscura y silenciosa en la que se formaron las primeras estrellas es uno de los desafíos a los que la moderna radioastronomía se enfrenta. La única radiación emitida por las grandes nubes de gas que se están agrupando en superestrellas es la conocida como la *línea de 21 centímetros* del hidrógeno neutro. Se trata de una señal electromagnética muy característica emitida por hidrógeno en la región de las microondas; su revelación confirmaría de manera inequívoca que ha sido posible penetrar en las tinieblas de la edad oscura. Es un signo enormemente débil que nace de una transición prohibida del átomo de hidrógeno, un fenómeno muy raro, que solo puede captarse cuando se mantienen bajo observación enormes cantidades de gas. Los radioastrónomos lo han reconstruido sondeando las grandes nebulosas de hidrógeno presentes en nuestra galaxia, pero todo intento de identificarlo en el ruido de fondo del universo se ha saldado en un fracaso.

Si se encontrara, sería posible reconstruir un mapa similar al de la radiación cósmica de fondo que nos proporcionaría una imagen muy precisa de la distribución de la materia en la época oscura, dado que podría verse el mecanismo de formación de las superestrellas en todos sus detalles y se entendería mejor qué papel ha jugado la fase de reionización en la formación de las galaxias.

Con el frenético ciclo de vida y muerte de las grandes estrellas primordiales se produce un nuevo fenómeno: la luz emitida por los nuevos astros es tan intensa que cuando embiste contra el hidrógeno, distribuido en el espacio circundante, ioniza los átomos del gas arrancándole sus electrones. El fenómeno resulta aún más violento con la muerte de las megaestrellas, cuando un destello deslumbrante señala el fin del combustible nuclear. Poco a poco, la mayor parte del material en el universo comienza a estar completamente ionizado, volviendo al estado que había abandonado cuando se produjo la recombinación, trescientos ochenta mil años después del Big Bang, y se asiste a un progresivo aumento de la opacidad. Es la época de la reionización, que comienza unos cientos de millones de años después de la aparición de las primeras megaestrellas.

Durante un largo período, el universo vuelve a la oscuridad, en una continua alternancia de luz y oscuridad que parece no tener fin. Ahora el universo está lleno de estrellas, enormes y muy brillantes, pero ya no es transparente. Los electrones libres interactúan con los fotones emitidos por las estrellas y los atenúan y capturan, impidiéndoles que transmitan luz a grandes distancias. El universo vuelve a caer, una vez más, en la oscuridad total.



El proceso continuará por unos cuantos centenares de millones de años, el tiempo necesario para que se ionice todo el gas hidrógeno. La materia ha vuelto ahora a ser un plasma, un estado similar al que había causado la era de la opacidad y, en teoría, podría absorber toda la luz producida. El universo, sin embargo, continúa expandiéndose y la densidad se reduce cada vez más hasta volverse tan baja que, una vez que se completa el proceso de reionización, todo recupera la transparencia de nuevo. Desde entonces un gas caliente e ionizado impregna todo el universo, pero su densidad es tan tenue que la luz puede atravesarlo de parte a parte.

Por último, antes de que el universo celebre sus primeros mil millones de años, la luz acaba prevaleciendo sobre las tinieblas. La batalla ha sido muy dura y a veces ha llegado a temerse que la oscuridad la aplastara para siempre. Pero ahora ha ganado y el éxito, esta vez, será definitivo.

## UNOS INCREÍBLES FUEGOS ARTIFICIALES CÓSMICOS

Los procesos nucleares que se activan en el interior de las megaestrellas condujeron a la formación de elementos cada vez más pesados. Carbono, nitrógeno, oxígeno y todos los demás elementos hasta llegar al hierro fueron acumulándose lentamente en las capas más interiores, encarcelados por la gravedad. Al término de su ciclo vital, la estructura de las grandes estrellas se vio desgarrada por titánicas explosiones, que lo distribuyeron todo en el espacio circundante. Al cabo de numerosos ciclos, de estos polvos estelares ricos en elementos pesados, incluidos muchos metales, nacieron otras estrellas y otros planetas, como el Sol y nuestra Tierra.

La fase paroxística en la que mueren las estrellas, produciendo efectos realmente espectaculares, tiene un papel decisivo en la formación de nuestro sistema solar y vale la pena describirla con todo detalle.

El final de las estrellas depende en gran medida de su masa. Las estrellas pesadas, superiores a las diez masas solares, producen en su interior una densidad y una temperatura monstruosas. En el corazón de estos monstruos se superan con mucho los miles de millones de grados y, a esas temperaturas, las reacciones de fusión involucran a todos los elementos. Con el paso del tiempo, los componentes más livianos —hidrógeno y helio— se agotan y los elementos más pesados producidos en las reacciones más complejas empiezan a fundirse: carbono, nitrógeno, oxígeno, etcétera. Cuando se llega a fundir el silicio y se produce hierro, el proceso se detiene. Reacciones posteriores ya no

son posibles y el corazón de la estrella, que ya no produce energía, colapsa catastróficamente.

Bajo la implacable fuerza de la gravedad, el núcleo central se contrae de repente, reduciendo su tamaño cientos de miles de veces y la estrella explota. Todas las capas superpuestas se encuentran suspendidas en el vacío y la furibunda fuerza de la gravedad las hace caer hacia el núcleo, convertido ya en un objeto minúsculo y terriblemente compacto. El aterrador impacto contra el núcleo y las reacciones nucleares resultantes arrojan todo el material hacia el exterior. Una enorme masa de gas, equivalente a muchas masas solares, produce una gigantesca onda de choque que se propaga por el espacio a más de 10 000 kilómetros por segundo y permanecerá visible durante siglos. Las nubes de gas, ricas en elementos pesados y químicamente variados, alcanzarán grandes distancias y constituirán el material básico para nuevas agregaciones.

Al igual que la fuerza de Zeus arroja a los Titanes al abismo, la gravedad, enfurecida por todo el tiempo perdido en contrarrestar la fuerza nuclear, irritada porque esta le ha impedido prevalecer hasta ahora, se toma la revancha y celebra su triunfo con un espeluznante grito silencioso, que destroza la estrella y lanza sus fragmentos al espacio a velocidades monstruosas.

Un destello de luz cegadora cruza el cielo. Tan llamativo que unos terrestres desprevenidos, a miles de años luz de distancia, cuando, a su debido tiempo, lo divisen, pensarán que ese punto luminoso, aparecido repentinamente en el cielo, no marca la muerte de una estrella, sino que indica el nacimiento de un nuevo astro, a los que llamarán *stellae novae* o *supernovas*. El estupor será universal y el fenómeno se registrará en los anales, considerándolo un signo de mala suerte o de buen agüero, según los casos y la conveniencia.

Todos los núcleos que componen nuestro cuerpo —el calcio de los huesos, el oxígeno del agua, el hierro de la hemoglobina— han cruzado este tormentoso y terrible pasado. Ahora los átomos que se han formado se someten mansamente a las reacciones químicas y biológicas que garantizan nuestra existencia. Si tan solo pudieran contarnos algunas historias sobre su infancia, tan llena de aventuras... o tal vez la pesadilla de ese nacimiento traumático: nacidos al principio en las condiciones extremas de temperatura y presión del corazón de una estrella, arrojados más tarde a velocidades monstruosas al vacío más absoluto, durante miles de millones de años, a la espera de que se cree una nueva agregación.

Las explosiones de supernovas se encuentran entre los fenómenos más catastróficos del universo y constituyen una preciosa fuente de información sobre la dinámica de las estrellas y la construcción de las galaxias. El fenómeno libera una enorme cantidad de energía en diferentes formas. La

mayor parte de la energía es emitida en forma de neutrinos: un flujo monstruoso de estas ligerísimas partículas ilumina el universo entero cada vez que explota una supernova. Afortunadamente, los neutrinos son delicados y suaves y la única señal que dejan en su paso a través de la Tierra consiste en algún inocuo signo en los grandes detectores consagrados a ellos. Una parte importante de la energía es utilizada en la aceleración de la onda de choque que impulsa el material por todas partes. El resto son ondas gravitacionales y radiación electromagnética de todas las frecuencias: luz, que produce un resplandor visible incluso para nosotros, pero sobre todo fotones de alta energía, ráfagas de rayos X y gamma que son arrojados, junto con las partículas cargadas aceleradas por la onda de choque, a largas distancias. Son fenómenos que duran semanas, o incluso meses; algunos, vinculados a la desintegración radiactiva de los isótopos producidos en la nube de gas, incluso décadas.

La explosión de una supernova es uno de los espectáculos naturales más increíbles que nuestra mente puede concebir, pero siempre es aconsejable que no se produzca a una excesiva cercanía a nosotros. Los efectos de esta radiación podrían ser letales para muchas, cuando no para todas, las especies que habitan el planeta. Por suerte, las estrellas masivas para las que está previsto semejante salida de escena tan pirotécnica son bastante raras y todas se hallan a mucha distancia de nosotros.

La más cercana a nosotros es Betelgeuse, una estrella rojiza, visible incluso a simple vista, justo por encima del cinturón de Orión. Es una supergigante roja, diez veces más pesada que el Sol, con un diámetro enorme. Es una estrella tan desproporcionada que, si la colocáramos en la posición del Sol, ocuparía el sistema solar casi hasta la órbita de Júpiter. La estrella está cerca de su final: se prevé que no le quedan más de uno o dos millones de años como máximo y cuando explote será un espectáculo. Su brillo iluminará las noches durante meses, como si siempre hubiera luna llena. Los grandes fuegos artificiales que Betelgeuse provocará no deberían ser un peligro para los terrícolas, admitiendo que todavía los haya, porque afortunadamente, la estrella dista de nosotros unos seiscientos años luz, una distancia considerable, que debería permitir a los habitantes de la Tierra disfrutar del espectáculo con total seguridad.

¿Y cómo acabará el Sol? Es demasiado pequeño para explotar catastróficamente y, sin embargo, cuando llegue el momento de su adiós, también nuestra estrella se prodigará en un espectáculo notable. Podría pensarse que la cosa no deja de suscitar preocupación, de no ser porque no ocurrirá hasta dentro de mucho. Durante bastante tiempo no deberíamos tener problemas, dado que las reservas de hidrógeno del Sol deberían bastar para otros cinco o seis mil millones de años. Cuando se agote, dará comienzo una serie de reacciones que afectarán a los elementos más pesados; llegados a ese

punto, el núcleo más interno se calentará y el volumen del Sol crecerá hasta transformarlo en una gigante roja. Sus dimensiones se expandirán con bastante rapidez, alcanzando y vaporizando, por orden, Mercurio, Venus y la Tierra. Esto ya no debería preocuparnos en exceso puesto que mucho antes el Sol habrá aumentado en aproximadamente un 40 por ciento su potencia y, por lo tanto, en la Tierra habrán desaparecido, desde tiempos inmemoriales, los casquetes helados de los polos y todos los océanos se habrán evaporado, haciendo imposible cualquier forma de vida.

Llegado a sus postrimerías, el Sol expulsará las capas externas de gas y se convertirá en una nebulosa planetaria. Lentamente, el núcleo más interno se deshará de la corona y aparecerá un objeto de un tamaño similar al de la Tierra, extremadamente denso, muy caliente y luminoso: una *enana blanca*, es decir, un pequeño cuerpo brillante compuesto de núcleos de carbono y oxígeno completamente ionizados y protegidos por un escudo compacto de electrones, lo suficientemente robusto como para evitar un ulterior colapso gravitacional. El diminuto astro continuará enfriándose, acaso durante miles de millones de años, hasta convertirse en una *enana negra*, es decir, un objeto inerte, invisible para todos, en el que no quedará rastro alguno de su antiguo esplendor.

## EL ENCANTO DE LAS ESTRELLAS NEGRAS

Estrellas de dimensiones mucho mayores que el Sol, cuando agotan su combustible nuclear, se convierten en objetos aún más exóticos: si tienen una masa comprendida entre las diez y las treinta masas solares, se forman las densísimas *estrellas de neutrones*, o pequeñas esferas de 10 a 20 kilómetros de radio que contienen una vez y media la masa del Sol.

Las estrellas de neutrones se forman cuando el colapso gravitacional es tan violento que machaca en un amasijo de protones y neutrones todos los núcleos de los elementos que lo componen. El gas de electrones, que actúa en enanas blancas como escudo protector, se hace añicos aquí en un instante. En objetos tan masivos, la fuerza de gravedad es tan intensa que los electrones y la materia nuclear se comprimen hasta el extremo de desencadenar reacciones de captura por parte de los protones que se transforman todos en neutrones. Se forma un cuerpo extremadamente compacto y de densidad monstruosa, similar a un gigantesco núcleo atómico, compuesto por completo de neutrones, estrechamente encajados entre sí por la fuerza fuerte. Una materia

de densidad tan extrema que la masa de una montaña como el Everest podría caber perfectamente en una cucharita de té.

Para hacerlo todo aún más impresionante, la pequeña esfera gira sobre sí misma a velocidades espantosas. Se han identificado estrellas de neutrones que solo emplean algunas milésimas de segundo para dar un giro completo. Las capas superficiales de estas estrellas, que giran a cientos de revoluciones por segundo, se mueven a velocidades que pueden superar fácilmente los 50 000 kilómetros por segundo.

El fenómeno surge de la monstruosa contracción que se produce durante el colapso. El lento y pacífico movimiento de rotación alrededor de su propio eje de la estrella madre se ve exasperado para preservar el momento angular. Si el período originario se medía en semanas o meses, cuando el radio se contrae desde millones de kilómetros a unas pocas docenas la frecuencia crece a cientos de revoluciones por segundo. La patinadora sobre hielo, de repente, cruza los brazos sobre el pecho y la pirueta se vuelve mucho más rápida y espectacular.

La rápida contracción de las dimensiones, unida al colapso gravitacional, amplifica enormemente el campo magnético originario también. Esas gigantescas líneas de fuerza, que envuelven la gran estrella, se ven obligadas entonces a contraerse en torno al pequeño núcleo compacto y su densidad explota. Las estrellas de neutrones producen campos magnéticos extremos, miles de millones de veces superiores a los de las estrellas ordinarias.

Cuando el eje magnético de la estrella de neutrones no coincide exactamente con el eje de rotación, los electrones y los positrones, que quedan libres en la superficie de la estrella, se ven acelerados hacia los polos y producen un potente chorro de radiación electromagnética, que gira con la misma frecuencia de la estrella. Si la Tierra se halla en el cono de emisiones de esta estación de radio tan particular, podemos grabar una señal de radio que late de forma regular, un reloj de extrema precisión, una especie de potentísimo faro que, en lugar de luz, emite ondas de radio. Habremos descubierto un *púlsar*.

## LA SINGULARIDAD DE LOS AGUJEROS NEGROS

Cuando la masa de la estrella es verdaderamente anómala, por encima de las treinta masas solares, el resultado del colapso es la formación de un *agujero negro*. Ni siquiera los neutrones pueden resistir el empuje de la gravedad y

acaban hechos añicos; incluso sus componentes elementales se comprimen de manera furibunda, hasta el extremo de concentrar la masa residual en un volumen virtualmente infinitesimal.

Nacen de esta forma sistemas en cuyo interior rigen leyes de la física que aún no conocemos y que nos permiten almacenar en un espacio inaccesible, que corresponde a unas pocas decenas de kilómetros de diámetro, de cinco a cincuenta masas solares.

Será porque evoca una de las pesadillas más recurrentes —la de la caída imparable en un pozo sin fondo— o tal vez porque, en el pasado lejano, nuestros antepasados vivieron el peligro de ser despedazados y devorados por feroces fieras, el caso es que, tan pronto como se nombran los agujeros negros, se activa inmediatamente un reflejo de pánico ancestral.

Hasta hace unos años, el tema interesaba como mucho a unos pocos miles de especialistas, que lo debatían en sus congresos, serenamente inconscientes de que no tardaría en producirse una explosión de interés popular hacia un tema tan exótico.

La idea de que nuestro firmamento puede albergar *estrellas oscuras* tiene al menos un par de siglos de antigüedad. El primero en plantear esta hipótesis, en 1783, fue el reverendo John Michell, filósofo de la naturaleza y destacado científico de su época. Razonando acerca de la teoría corpuscular de la luz desarrollada por Newton, a Michell le resultó sencillo imaginar estrellas tan compactas y masivas que producían una monstruosa atracción gravitatoria, tan poderosa como para encerrar para siempre la luz que emitía su superficie. Las partículas de luz se comportarían igual que piedras lanzadas desde la Tierra, dibujando trayectorias parabólicas que las devolvían inexorablemente al lugar de partida.

La idea de Michell era tan futurista que nadie la tomó en consideración durante casi doscientos años. Un primer momento de ruptura se registra en 1916, cuando Albert Einstein acababa de publicar su teoría de la relatividad general y Karl Schwarzschild, un físico alemán que se había alistado en la Gran Guerra y luchaba en el frente ruso al mando de una posición de artillería, se las apañó para recibir ese artículo que entrará en la historia. En poco tiempo, Schwarzschild, utilizando un sistema de coordenadas diferente, consiguió encontrar una solución exacta a las ecuaciones para las que el propio Einstein no había ido más allá de soluciones aproximadas.

Con este nuevo enfoque, el espacio-tiempo adquiriría una simetría esférica y para cada masa podía definirse un radio, al que se hará referencia con el nombre de Schwarzschild, por debajo del cual surgía una singularidad: una curvatura del espacio-tiempo tan elevada que los propios fotones no podrían escapar. La solución era tan curiosa que ni Einstein ni el propio Schwarzschild se atrevieron a escribir, o tal vez ni siquiera a imaginar, que

detrás de la formulación matemática podía esconderse una nueva clase de cuerpos celestes.

Habrá que esperar a los años sesenta para que se acuñe la expresión *agujero negro*, introducida en 1967, con un toque de fuerte ironía, por el físico estadounidense John Wheeler, entre los primeros en intuir que podía tratarse de objetos astronómicos reales y que se abría un nuevo campo de investigación. Desde entonces el estudio de los agujeros negros y la búsqueda de cualquier posible señal que pudiera sugerir su presencia ha marcado profundamente la astrofísica moderna.

Los años setenta nos trajeron las contribuciones teóricas fundamentales de Roger Penrose y Stephen Hawking y las primeras observaciones indirectas de los candidatos a agujeros negros. Un catálogo que ha ido enriqueciéndose año tras año, hasta llegar al sorprendente descubrimiento de agujeros negros supermasivos presentes en el núcleo central de la mayor parte de las galaxias elípticas o espirales. Todos recordamos, por último, que fue una colisión entre agujeros negros, de aproximadamente treinta masas solares, lo que provocó la primera señal de ondas gravitacionales registradas por grandes interferómetros estadounidenses en 2015.

Los agujeros negros pueden «verse» indirectamente, a través de las señales que nacen de su interacción con formas de materia ordinaria. Cuando orbitan en las proximidades de una estrella masiva, sus fuerzas de marea arrancan a su desafortunada compañera enormes cantidades de material: el gas ionizado, acelerado por el campo gravitacional del agujero negro que se dispone a engullirlo, forma discos de crecimiento que emiten radiaciones en muchas longitudes de onda. Para que el espectáculo resulte más pirotécnico aún, se han registrado a menudo imponentes chorros de materia, expulsados de los polos, que viajan en el espacio a una velocidad cercana a la de la luz.

Los agujeros negros son, por lo tanto, una nueva clase de cuerpos celestes, bastante rara y sin embargo presentes en muchas zonas del universo. Hoy sabemos que son objetos muy diferentes entre sí, no solo por dimensiones y características, estacionarios o giratorios, neutros o cargados, sino también por la dinámica de la que nacen y la evolución que experimentan.

Pueden formarse a causa del colapso gravitacional de las estrellas supermasivas. Pero también pueden nacer cuando las estrellas de neutrones chocan entre sí o alcanzan una masa crítica absorbiendo la materia de las estrellas ordinarias con las que interactúan en los sistemas binarios.

## UNA FUSIÓN QUE VALE ORO

La colisión entre estrellas de neutrones, además de dar lugar a nuevos agujeros negros, pueden producir efectos asombrosos.

Imaginémonos una enorme nube de oro y platino con una masa ciento de veces superior a la de la Tierra. Fue ese el increíble espectáculo que se presentó ante los ojos de los astrónomos, hace algún tiempo, cuando concentraron sus instrumentos en una zona del cielo próxima a la constelación de la Lira. Una auténtica «fábrica cósmica de metales pesados» debida a un acontecimiento catastrófico: la colisión entre dos estrellas de neutrones.

Estamos en agosto de 2017 y desde hace unos días, por primera vez, los dos interferómetros estadounidenses de Ligo y el italiano-francés de Virgo, cerca de Pisa, están trabajando juntos. Se afanan en la búsqueda de ondas gravitacionales producidas por la fusión de los agujeros negros e inmediatamente registran un acontecimiento similar al del primer descubrimiento en 2015. Luego, tres días después, recogen una nueva señal, extraña, diferente a las habituales, menos intensa pero mucho más prolongada en el tiempo: la firma característica de las ondas gravitacionales producidas por la fusión de estrellas de neutrones.

No se trata de cuerpos ultramasivos, como los que originaron las primeras señales; también dos estrellas de neutrones, cuando se encuentran, acaban por fusionarse en un choque catastrófico; mientras se engarzan una en torno a la otra en espiral y se acercan a velocidades cercanas a las de la luz, deforman el espacio-tiempo y producen una señal de ondas gravitacionales que dura decenas de segundos.

Todo esto tiene lugar a una distancia, en términos cósmicos, bastante modesta: a tan solo ciento treinta millones de años luz, en lugar de los mil cuatrocientos millones del primer y sensacional descubrimiento. La señal inicial era más débil porque las masas que se fusionaron eran más pequeñas, pero la menor distancia facilitó la observación.

El hecho de que en esta ocasión también estuviera Virgo en funcionamiento permitió la triangulación. Con tres instrumentos en marcha, esta vez fue posible identificar la fuente y la alerta que se envió a setenta observadores distribuidos por todos los continentes y en el espacio produjeron una gran cosecha de resultados. La señal de onda gravitacional vino acompañada por fotones de alta energía y secuencias de emisiones electromagnéticas de energía más baja que durarán semanas.

Fue fácil percatarse de inmediato de que la ráfaga de rayos gamma registrada un par de segundos después por otros instrumentos, como Fermi — un telescopio especial en órbita alrededor de la Tierra, y que provenía



exactamente de la misma región— estaba relacionado con el mismo fenómeno. Con toda probabilidad, era la señal de que en la colisión se había formado un agujero negro.

Este acontecimiento del 17 de agosto de 2017 supuso el espectacular debut de la astronomía *multimensajero*. Un mismo fenómeno se estudia utilizando las señales que emite en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético y en ondas gravitacionales y se obtiene una comprensión mucho más detallada.

Ahora sabemos que cuando dos estrellas de neutrones se fusionan, producen ondas gravitacionales; y hemos comprendido de dónde provienen las ráfagas de rayos gamma sobre cuyo origen, hasta hoy, quedaban aún muchas dudas. Al final hubo una sorpresa increíble, que se produjo en las semanas posteriores a la primera señal: los astrónomos identificaron, entre los residuos de la fusión, una pequeña nebulosa de materiales pesados. Una enorme cantidad de polvo de metales preciosos, gigantescas masas de oro y platino producidas por la colisión y expulsadas a velocidades monstruosas al espacio circundante, cual espectacular confirmación de la teoría que hipotetizaba que los elementos más pesados que el hierro solo podían formarse en acontecimientos catastróficos de este tipo.

Una vez más vivimos la experiencia de descubrir fenómenos de violencia desproporcionada que se ocultan bajo la apariencia de un equilibrio cósmico, a primera vista plácido y sosegador.

Con la descripción de estos acontecimientos extraordinarios, nuestro relato ha llegado al final del quinto día. El universo se ha poblado con una infinidad de estrellas que, una generación tras otra, han ido difundiéndose por todo el cosmos grandes cantidades de gas y polvo de elementos pesados, entre los cuales merodean furtivamente estrellas de neutrones y agujeros negros. A estas alturas, han pasado quinientos millones de años desde el origen del universo y ya se están formando las primeras galaxias.

## Día 6

### Y el caos se disfrazó de orden

Al comienzo del sexto día, en el universo brillan ya una infinidad de estrellas gigantescas. Se reproducen, de generación en generación, a través de ciclos temporales bastante rápidos, medidos obviamente a escalas cósmicas. Cada vez que muere una, la gran nube de hidrógeno y helio ionizados que la envuelve se enriquece con elementos cada vez más pesados, hasta el extremo de que se encuentran por todas partes grandes nebulosas de gas y polvo que, a su vez, darán lugar a nuevas generaciones de estrellas, más pequeñas y de mayor duración.

La gravedad actúa lentamente sobre estos aglomerados de materia que se han formado alrededor de los grandes terrones de materia oscura; preponderantes en gran medida en cuanto a masa, estos aglomerados generan auténticos sumideros de potencial, hacia donde se lanzan las estrellas, el gas y el polvo. Todo corre a precipitarse hacia esa nada, un corazón de tinieblas invisible que lo atrae irremisiblemente todo. Debido a los choques que se crean en esta compresión, el gas se calienta y aumenta la presión que logra contrarrestar el colapso ulterior. El grueso se concentra en el centro del halo de materia oscura, donde la densidad crece y todo lo demás gravita a su alrededor.

La preservación del momento angular impide que estrellas y conglomerados de materia se metan derechos en el hoyo central; la simetría subyacente los obliga a girar, lentamente, alrededor del núcleo central y se forma un disco de rotación, un vórtice similar al de los huracanes: nace así una galaxia.

Estamos cayendo, irremediablemente, no cabe duda, y no hay escapatoria para tal caída. Nos está engullendo un terrible remolino, la más angustiada de nuestras pesadillas se ha hecho realidad. Nuestro final está marcado, el mecanismo caótico y dinámico que lo gobierna todo no nos deja esperanza. Los tiempos de esta catástrofe, en verdad, son muy largos, no solo en relación con nuestras vidas individuales, sino también con respecto a los tiempos

característicos de nuestra especie, que habita en el mundo desde hace apenas unos pocos millones de años. La vida de la galaxia se desarrolla a una escala de tiempo de muchos miles de millones de años; habrá todo el tiempo que se quiera para construir sistemas solares, y planetas, y formas de vida que se pregunten cómo funciona todo esto.

El caos se ha disfrazado de orden, se ha puesto la hermosa máscara del equilibrio y de la armonía, y este gran engaño nos tranquiliza, y nos conforta, desde hace milenios.

## SPIRA MIRABILIS

El nombre de nuestra galaxia, Vía Láctea, alude literalmente al griego *galaxias*, de donde se deriva el término genérico de *galaxia*, que puede traducirse como *de leche* o *lácteo*. En este nombre se percibe el eco del mito de los orígenes, vinculado a una de las muchas traxadas de Zeus. Prendado de Alcmena, el rey de los dioses adopta los rasgos de su esposo, se aparea con la hermosa terrícola y la fecunda. De la relación nacerá Hércules, que Zeus secuestra inmediatamente, para llevárselo consigo al Olimpo. Allí lo deposita en el regazo de su esposa Hera, mientras esta dormía, para que el niño pueda saborear su leche divina y convertirse él mismo en inmortal.

Pero el pequeño energúmeno, incapaz ya desde recién nacido de mantener bajo control la exuberancia física que lo llevará a realizar empresas legendarias, se pega con ímpetu excesivo al pecho de la diosa y chupa vorazmente. Hera, despertándose sobresaltada, rechaza con fuerza a ese lactante desconocido y la leche, salida de los pezones divinos, llena el cielo de gotas blanquecinas, que inmediatamente se convierten en minúsculas estrellas, mientras que las que caen al suelo se convertirán en lirios.

Nuestra Vía Láctea es un conglomerado de estrellas, polvo y gas que se mantiene unido gracias a un enorme halo de materia oscura. Se trata de una gran galaxia en espiral, un gigantesco molinete cósmico, organizada en brazos más brillantes, en los que se concentran las estrellas de nueva formación; contiene más de doscientos mil millones de estrellas y todo gira alrededor a la densa región central. En el núcleo, la concentración de materia es tal que constituye una especie de barra de densidad constante, de ahí su clasificación como galaxia espiral barrada.

Su forma sigue la geometría de la espiral de crecimiento, una curva que se encuentra en muchos procesos naturales. Partiendo desde el centro, el radio

crece regularmente con el ángulo, formando la subyugante geometría que caracteriza a algunas conchas, como *Nautilus*. Descartes fue el primero en describir su función y Jakob Bernoulli se prendó de ella hasta el extremo de llamarla *espiral maravillosa*, *spira mirabilis* precisamente, y pedir que fuera esculpida en su lápida.

A diferencia de lo que sucede en el sistema solar, donde la velocidad de los planetas disminuye al aumentar su distancia respecto al Sol, aquí todo orbita alrededor del núcleo galáctico con una velocidad prácticamente idéntica, unos 200 kilómetros por segundo, es decir, nada menos que 700 000 kilómetros por hora. Ya hemos visto que esta velocidad radial, casi constante, es una de las pistas más evidentes de la engorrosa presencia de materia oscura. En efecto, lo que llamamos la Vía Láctea es solo una pequeña parte de nuestra galaxia.

El polvo, el gas y las estrellas, es decir, la materia visible, se distribuyen sobre un disco plano, de unos cien mil años luz de diámetro y de dos mil de espesor. Nuestro Sol, arrastrando consigo sus planetas, orbita a una distancia de aproximadamente veintiséis mil años luz del centro galáctico y, a pesar de su considerable velocidad, emplea más de doscientos millones de años para completar una vuelta completa. Todo está inmerso en un inmenso halo esferoidal de materia oscura, cuyo diámetro se estima aproximadamente en torno a un millón de años luz. La parte luminosa es casi insignificante en comparación con la enorme nube de esa materia invisible y misteriosa, que se insufla por doquier y todo lo rodea, y que contribuye con alrededor del 90 por ciento a la masa global.

## GALAXIAS, CÚMULOS Y COLISIONES

La fase de formación de las grandes galaxias abarca un largo período de la vida del universo. Las primeras agregaciones, en efecto, empiezan a formarse alrededor de quinientos millones de años después del Big Bang y prosiguen durante los tres o cuatro mil millones de años sucesivos, mientras que las pequeñas galaxias compactas continuarán formándose también en el curso de los miles de millones de años que siguieron.

La Vía Láctea es una galaxia de dimensiones notablemente por encima de la media. Por el volumen que ocupa y el número de estrellas que contiene, puede considerarse, con razón, una galaxia gigante. Con todo, existen auténticos monstruos, en comparación con los cuales el no desdeñable tamaño

de nuestra Vía Láctea parece ridículo. Uno de ellos es IC1101, una galaxia supergigante que contiene más de cien mil millones de estrellas, con un diámetro global de seis millones de años luz.

Se ha calculado el número total de galaxias que hay en el universo, extrapolando las observadas en una pequeña porción de cielo que parecía no contener ninguno. El resultado es impresionante: las estimaciones más recientes hablan de más de doscientos mil millones de galaxias. Sin tener en cuenta las de tamaño demasiado pequeño o demasiado poco luminosas para ser observadas a grandes distancias.

Junto con las galaxias espirales, las elípticas constituyen la forma más común; en ellas las estrellas se organizan en un volumen ovoide, casi esférico. Estos dos tipos cubren casi el 90 por ciento del total, mientras que el resto tiene formas irregulares.

Las que tienen formas más extravagantes son a menudo galaxias de pequeñas dimensiones. Entre estas se encuentran estructuras en forma de anillo con distintas configuraciones, por no hablar de las más extrañas aún, para las que se han buscado semejanzas con la silueta de un pingüino o con las letras del alfabeto. A menudo, las formas más excéntricas se deben a colisiones entre galaxias. En el encontronazo, es muy poco probable que una sola estrella choque con otro cuerpo celeste, pero las fuertes interacciones gravitacionales ocasionadas por la cercanía del encuentro destruyen la estructura ordenada del sistema, que adopta en consecuencia las formas más extravagantes. Se considera que todas las galaxias se formaron originalmente como galaxias de disco y que las elípticas son el resultado de procesos de fusión o canibalización de galaxias satelitales.

Alrededor de la Vía Láctea se encuentran otras dos galaxias gigantes: la más cercana es Andrómeda, mientras que la Galaxia del Triángulo se halla un poco más apartada. Las tres forman parte del grupo local alrededor del cual gravitan satélites como la Gran y la Pequeña Nube de Magallanes. Las galaxias satélites son unas sesenta en total; a menudo se trata de elípticas enanas, algunas verdaderamente minúsculas, que apenas contienen unos pocos miles de estrellas.

Nuestra Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda parecen moverse en una trayectoria de colisión. La distancia es considerable —2,5 millones de años luz— pero tampoco es como para tomar a broma la velocidad con la que parecen dirigirse una contra la otra: 400 000 kilómetros por hora. En resumen, existe la posibilidad de que dentro de cinco o seis mil millones de años las dos grandes galaxias entablen una batalla cósmica verdaderamente espectacular. Al acercarse, entrarían en una fase turbulenta muy prolongada, en la que las fuerzas de marea deformarán irreversiblemente dos espirales maravillosas, produciendo quizá una única estructura gigantesca. La Galaxia del Triángulo permanecerá viéndolas venir durante cierto tiempo, para acabar

convirtiéndose más tarde en un satélite de la galaxia que nazca de la fusión de los dos gigantes y con el tiempo, tal vez acabe fundiéndose también con el nuevo y enorme conglomerado.

Los grupos locales pueden estar formados por decenas de galaxias; si se supera el centenar, ya no se habla de grupo sino de un cúmulo. Grupos, cúmulos y galaxias aisladas forman a su vez estructuras aún más gigantescas llamadas *supercúmulos*. Esta organización jerárquica es bastante común y puede encontrarse casi por todas partes. El grupo local de la Vía Láctea, por ejemplo, forma parte del supercúmulo de la Virgen, un enorme sistema que contiene casi cincuenta mil galaxias. Los diferentes supercúmulos están conectados entre sí por filamentos de galaxias, que separan zonas de vacío muy extensas. Esta organización de tipo jerárquico acaba por formar una superestructura parecida a una esponja con enormes burbujas de vacío intercalado con áreas con una alta densidad de galaxias: la estructura a gran escala del universo.

## EL CORAZÓN DE LAS TINIEBLAS DE NUESTRA VÍA LÁCTEA

El núcleo de nuestra galaxia puede verse incluso a simple vista, en las noches claras de verano, mirando hacia el sur, justo por encima del horizonte, en la constelación de Sagitario. Aunque no se aprecien demasiadas estrellas, si el aire está despejado y estamos lejos de fuentes de contaminación lumínica puede entreverse una especie de claridad difusa. Es lo que queda de la luz de una gran concentración de estrellas atenuada por el polvo que se adensa alrededor del centro galáctico. Para obtener una imagen más nítida, deben usarse telescopios capaces de penetrar el polvo, como los de infrarrojos o los que realizan una especie de radiografías de rayos X.

Las observaciones con estos instrumentos han permitido poner de relieve la enorme concentración de estrellas del núcleo y han conducido a un descubrimiento inquietante. Cuando se midió la velocidad de rotación orbital de algunas de estas estrellas se vio de inmediato que había algo que no cuadraba dado que todas parecían moverse a velocidades muy superiores a las previstas. De este modo, cuando se decidió verificar, durante meses, el movimiento de decenas de estas estrellas muy próximas al centro de la galaxia, se midieron velocidades asombrosas; una rotaba incluso a 5000 kilómetros por segundo.

Cuando se ven docenas de estrellas que orbitan alrededor de la nada, a velocidades que implican una fortísima atracción gravitacional, la conclusión no puede ser más inequívoca: en el centro de nuestra galaxia hay una gran masa concentrada en un objeto invisible y gigantesco, con un peso cuatro millones de veces mayor que el Sol: así fue como conocimos la existencia de Sagitario-A\*. En su corazón más profundo y tenebroso, nuestra plácida Vía Láctea esconde una especie de monstruo. He aquí materializada la peor de las pesadillas ancestrales: estamos cayendo en un pozo gravitacional sin fondo que, antes o después, se lo tragará todo, inexorablemente.

Sagitario-A\* es un agujero negro de masa enorme y tiene un radio de Schwarzschild de unos 12 millones de kilómetros; su densidad es alta, pero ni remotamente comparable a la de los agujeros negros de origen estelar, que son mucho menos pesados pero minúsculos en cuanto a dimensiones. Pertenece a una nueva clase: agujeros negros supermasivos; posee características muy diferentes a las de sus semejantes, que son la última fase de la evolución de las grandes estrellas. En comparación con Sagitario-A\*, los agujeros negros de una treintena de masas solares, que produjeron la primera señal de ondas gravitacionales, nos parecen objetos minúsculos y casi bien educados.

El azar ha querido que el agujero negro más cercano a nosotros se sitúe precisamente allí, en el centro de la constelación en la que la mitología griega situaba a Quirón, mitad hombre y mitad caballo, el más hábil de los arqueros. El monstruoso Quirón nació del apareamiento contra natura de Crono, quien poseyó a la ninfa Filira bajo la forma de un caballo. Abandonado por su madre, asqueada por su aspecto, Apolo lo educó en todas las artes hasta convertirlo en el más civilizado de los centauros, sus violentos y animalescos semejantes. Es el Sagitario por antonomasia, símbolo del hombre que, a través del conocimiento y la cultura, supera su naturaleza animal: Quirón, un gran experto en medicina, a quien la leyenda dibuja como maestro del conocimiento y mentor de grandes héroes, empezando por Aquiles.

Sagitario-A\*, como Quirón, puede ayudarnos a entender un mundo que nos es hostil y parece estar lleno de peligros. El comportamiento de los agujeros negros supermasivos, el estudio de esas regiones turbulentas en las que la materia interactúa en condiciones extremas, podría ser la clave para comprender cosas muy importantes, que aún se nos escapan. Esa es la razón por la que muchos telescopios e instrumentos de todo tipo están dirigidos hacia allí, recopilando datos cada vez más sorprendentes.

Se ha comprobado que el gas y el polvo, que caen hacia el agujero negro, sufren un calentamiento de millones de grados y emiten, además de radiación infrarroja, ondas de radio también. Es probable que Sagitario-A\* tenga un campo magnético, y se han detectado huellas de un disco de acrecimiento, es

decir, una especie de anillo formado por la materia que es arrancada de las estrellas más cercanas y gira a su alrededor. Se han recogido señales que parecen indicar la presencia de chorros relativistas en los polos: una especie de hipo o regurgito del monstruo que, cuando traga grandes cantidades de polvo y gas, expulsa una parte, empujándola hacia los polos con tal violencia como para hacer que alcance velocidades cercanas a la de la luz.

Para acabar, la última de una serie de sorpresas, observando un cúmulo de siete estrellas, a tres años luz de distancia, los astrónomos han encontrado otro agujero negro. El cúmulo se mantiene unido gracias a este objeto tan pesado como mil trescientos soles y todo orbita alrededor de Sagitario-A\*. Es el primer agujero negro de masa intermedia descubierto dentro de nuestra galaxia, y su presencia allí puede darnos indicaciones sobre el mecanismo de crecimiento desmesurado de Sagitario-A\*, en parte debido, casi seguro, a la canibalización de otros agujeros negros de grandes dimensiones. El descubrimiento, muy reciente, de otra docena de agujeros negros que lo rodean ha reforzado aún más esta hipótesis.

Al estar tan cerca de nosotros, el núcleo central de la Vía Láctea es un laboratorio ideal para someter a estrés la relatividad general y estudiar los fenómenos que se producen en zonas de alta deformación espacio-temporal. Por tal razón se mantienen bajo continua vigilancia las decenas de grandes estrellas que giran alrededor de Sagitario-A\* en estrechas y rápidas órbitas elípticas.

Tal vez la enseñanza de Quirón, el gran y sabio Sagitario, también nos permita a nosotros, pobres científicos terrenales, emanciparnos, tarde o temprano, de la ignorancia abismal en la que vivimos con respecto a estos gigantescos objetos celestes.

## NO DESPIERTES AL DRAGÓN DORMIDO

La masa de Sagitario-A\* es ciertamente enorme, pero palidece frente a la del agujero negro en el centro de NGC-4261, una galaxia en la constelación de la Virgen. Este gigantesco objeto pesa tanto como 1200 millones de masas solares.

Se trata sin duda un caso extremo, pero a estas alturas es una convicción compartida que casi todas las grandes galaxias contienen en su núcleo uno de estos agujeros negros supermasivos, con masas que van desde unos pocos millones hasta miles de millones de masas solares. En definitiva, parece ser



que sin la presencia de estos simpáticos monstruos no pueden construirse esos maravillosos objetos que son las galaxias: configuraciones dinámicas de materia que son estables a escalas de miles de millones de años.

Los pesos pesados de los agujeros negros tienen otras características que los diferencian de los más pequeños, resultado de la evolución de estrellas masivas. No tienen, por ejemplo, la monstruosa densidad de sus congéneres más compactos. Los agujeros negros más gigantescos pueden alcanzar una densidad menor que el agua, lo que los hace, aparentemente, aún menos feroces. Sus fuerzas de marea, las que te hacen pedazos si te acercas a un agujero negro de masa equivalente a tres o cuatro veces la del Sol, son mucho más suaves, casi imperceptibles. Uno podría cruzar su horizonte de sucesos sin darse cuenta, por lo menos al principio. A pesar de este aspecto tan dócil, sin embargo, se encuentran entre los objetos más peligrosos del cosmos, capaces de devastar una galaxia entera. Los agujeros negros supermasivos, en efecto, se hallan en la raíz de algunos de los fenómenos más energéticos del universo.

Por ejemplo, durante muchas décadas, los cuásares —nombre que se deriva de la contracción de *quasi-stellar radio source*, es decir, fuente de radio casi estelar— supusieron un auténtico misterio. Hoy se denominan de forma más moderna con el acrónimo QSO, que significa objetos casi estelares. Se trata de las fuentes de luz más poderosas del universo, descubiertas hacia finales de los años cincuenta. Inicialmente, fueron identificados porque emitían fuertes señales de radio; más tarde, al dirigir los telescopios ópticos hacia las zonas de donde provenía la señal, se registraron señales luminosas muy fuertes. La región activa resultaba muy pequeña, prácticamente puntiforme, como si fuera una única estrella la que produjera esa maravilla.

Pero no hay ninguna estrella que pueda brillar con una luz mil veces más potente que la emitida por los doscientos mil millones de estrellas de la Vía Láctea. La conclusión era que en esas lejanas galaxias estaba sucediendo algo misterioso, que tenía que ver con cuerpos celestes fuera de lo común. Se hipotetizaron los fenómenos más extravagantes, pero, al final, a medida que fueron recopilándose datos cada vez más completos, la conclusión fue sensacional: los objetos más brillantes de todos resultaron ser las *estrellas negras*. Los cuerpos puntiformes que emitían esa potencia estaban en el centro de las galaxias donde se ocultaban agujeros negros supermasivos; a menudo los simpáticos «dragones» dormían pacíficamente, como los de los cuentos de hadas cuando nadie los molesta; en algunas ocasiones daban pruebas de todo su poder, «escupiendo» fuego, luz y toda suerte de ondas electromagnéticas a distancias monstruosas: se trataba, en este caso, de núcleos galácticos activos.

Los agujeros negros supermasivos que se encuentran en el núcleo de muchas galaxias son pacíficos a menudo, como parece ser el caso de

Sagitario-A\*, que engulle material, desmantela algunas estrellas pero, en general, se comporta de manera muy educada y discreta. De hecho, nos hemos percatado de su presencia solo recientemente, por habernos empeñado a toda costa en ir a escudriñar el interior del núcleo galáctico. Impulsados por la curiosidad, fuimos a ver qué ocurría bajo la capa de polvo que lo ocultaba todo y descubrimos que Sagitario-A\* juega al gato y el ratón con las estrellas que orbitan a su alrededor rápidamente. De lo contrario, nadie se habría dado cuenta de nada raro.

El núcleo de nuestra galaxia, visto desde afuera, no nos preocupa, no emite radiación peligrosa, no causa daños. Pero el nuestro es un caso de enorme fortuna. A veces sucede que el núcleo de una galaxia entra en un estado de excitación paroxística y entonces sí que se multiplican los problemas. Eso ocurre cuando allí, justo alrededor del centro, hay una densidad muy alta de materia, estrellas, gas y polvo; en definitiva, si hay mucho de comer, en el agujero negro se desencadena una especie de frenesí alimenticio. Se rodea con un enorme disco de acrecimiento, la materia es disgregada y arrastrada para rotar a su alrededor en un carrusel infernal donde las elevadísimas velocidades, las colisiones y las interacciones entre los jirones de materia producen fenómenos que calientan el conjunto hasta alcanzar los millones de grados.

La materia ionizada y reducida a sus componentes elementales produce inmensos campos magnéticos que, a su vez, interactúan con el resto del material. Cuando hay discos de crecimiento significativos, se ven a menudo enormes chorros de partículas con radiación asociada que emergen de los polos del agujero negro. Estamos hablando de haces colimados, altamente energéticos, de materia y radiación, emitidos por el núcleo activo en dirección perpendicular al plano de la galaxia. Las imágenes recogidas son impresionantes: pueden verse inmensos filamentos de materia que, nacidos del centro galáctico, llegan a extenderse decenas de miles de años luz. La intensa radiación emitida se muestra en forma de lóbulos, emergidas de la galaxia formando protuberancias que se extienden durante millones de años luz.

Aún no tenemos completamente claros los detalles del fenómeno. Se cree que mientras una parte de la materia ionizada desaparece dentro del horizonte de sucesos y hace crecer ulteriormente el agujero negro, una fracción es desviada hacia los polos donde experimenta aceleraciones aterradoras. Es como ver en funcionamiento, en el cosmos, cientos de aceleradores mucho más potentes que el LHC, que producen chorros relativistas parecidos a los que estudiamos en el CERN, pero en dimensiones comparables a las de una galaxia.

Una pequeña fracción de galaxias activas tiene espectaculares chorros propios orientados precisamente hacia la Tierra. En este caso podemos observar un espectro de radiación electromagnética amplificado por la enorme

velocidad de los chorros, caracterizado por variaciones rápidas y violentas de flujo. Históricamente, este tipo de fuentes se llamaban *blazar*, por el nombre del primer objeto extraño que manifestó este comportamiento: BL Lacertae, que se hallaba en la constelación de Lacerta y tenía una luminosidad tan dependiente del tiempo que se creía que era una estrella variable perteneciente a nuestra Vía Láctea. Con observaciones más precisas, pudo verse, en cambio, que era una galaxia situada a novecientos millones de años luz de distancia. Cuando el origen del comportamiento se relacionó con un núcleo galáctico activo, el fenómeno se situó en esta clase más amplia.

Los cuásares, los blazares y los núcleos galácticos en general son fenómenos bastante raros en el universo y, sin embargo, se han descubierto cientos de miles de ellos. Son escasísimos los que se encuentran en las galaxias enanas, mientras resultan bastante frecuentes, en una proporción de uno a cinco, en las elípticas gigantes, resultado de la fusión de varias galaxias.

Parece definitivamente constatada una fuerte dependencia con la edad de la galaxia. Hay una alta fracción de cuásares, por ejemplo, en las galaxias más antiguas, indicio claro del hecho de que los núcleos galácticos activos han jugado un papel fundamental en la construcción de las galaxias primordiales. Como evidencia de este argumento, el más antiguo quásar identificado se remonta a setecientos millones de años después del Big Bang. Ya estaban presentes, en definitiva, en las primeras grandes estructuras, pero el ápice de su presencia se remonta a hace unos diez mil millones de años, y luego el porcentaje disminuye.

El hecho parece estar relacionado con un mecanismo de agotamiento progresivo del combustible necesario. El agujero negro concentra en su interior, para quemarlo y reciclarlo, todo el material que consigue atraer de las proximidades durante miles de millones de años. El mecanismo en sí y la fortísima radiación producida en el proceso acaban depauperando todo el núcleo del combustible necesario. Sin material nuevo, el disco de acrecimiento se detiene y el proceso se autoextingue.

Esto explicaría por qué muchas galaxias grandes, como la nuestra, aunque alberguen un enorme agujero negro, no tienen núcleos activos: no les queda suficiente material. Así pues, en lo que a la Vía Láctea se refiere, podemos dormir tranquilos. A menos que no entre en colisión con Andrómeda. Cuando esto suceda, la fusión podría llevar de nuevo al núcleo material suficiente como para reactivarlo y la vida en los planetas de la galaxia podría volverse bastante complicada.

Al final, el papel de estos «monstruos devoradores» que ocupan el centro de muchas galaxias parece esencial en la dinámica de conjunto. Los gigantescos agujeros negros son al mismo tiempo grandes destructores y grandes creadores. La desenfundada danza a la que someten a la materia se asemeja a una espectacular reedición, a escala cósmica, de la de los derviches

giróvagos, los sufíes mevlevíes de Konya. Evoca el mito de la destrucción-creación a través de la danza de Shiva, pero, sobre todo, al retener tan gran número de estrellas en ese peligroso carrusel durante miles de millones de años, regala a la materia algo precioso: el tiempo que le hace falta para producir sistemas solares, planetas y formas de organización cada vez más complicadas.

Sigue pendiente el problema de entender cómo se forman los agujeros negros que tienen masas millones o miles de millones de veces superiores a la del Sol. Sabemos que una vez que un agujero negro se coloca en el centro de una galaxia, puede crecer de forma desmesurada al engullir lentamente todo lo que la rodea. Pero ¿cuál es el punto de partida? Es posible que, antes incluso de que relucieran las primeras estrellas, las inmensas nebulosas de gas primordial se acumularan formando cuasi-estrellas, objetos altamente inestables que, en lugar de evolucionar hasta convertirse en estrellas ordinarias, colapsaran en agujeros negros. Hay incluso quienes plantean la hipótesis de la formación de agujeros negros primordiales, nacidos menos de un segundo después del Big Bang, cuando las imponentes fluctuaciones de densidad del universo recién nacido podían inducir a grandes porciones de materia al colapso gravitacional. El nuevo campo, que pone en el centro estos cuerpos celestes tan voluminosos, todavía están llenos de misterios.

## LAS SUTILES FLECHAS DE ORIÓN

Mientras seguimos haciéndonos preguntas sobre el origen y la dinámica de estos fenómenos tan turbulentos, se van dando pasos adelante, decisivos para la comprensión de fenómenos que, hasta hace poco, eran totalmente misteriosos. Uno de estos es el origen de los rayos cósmicos.

Desde 1912 llevan buscando los científicos el origen de esta lluvia de partículas cargadas que embiste nuestro planeta desde cualquier dirección, incesantemente. Han llegado a registrarse algunas con una energía cien millones de veces superior a la del LHC y su origen ha sido un misterio hasta hace poco. Todo sucedió porque se aunaron, también en este caso, instrumentos diferentes para observar el mismo fenómeno, otro éxito de la astronomía multimensajero.

El punto de partida fue una alarma lanzada por IceCube, un experimento ubicado en la Antártida, especializado en la detección de neutrinos procedentes del espacio profundo.

La detección de neutrinos de alta energía, acontecimiento muy raro, producidos a partir de fuentes cósmicas, requiere detectores de tamaño monstruoso. Este es el caso de IceCube, «cubito de hielo», irónico nombre para un detector que tiene el volumen de una montaña, un «cubito» de un kilómetro de lado.

Se construyó en la Antártida, cerca de la estación Amundsen-Scott, para explotar la capa de hielo purísimo y transparente que recubre el continente. Se perforó el hielo, deritiéndolo, en un centenar de puntos diferentes, a cien metros uno del otro y organizados en una cuadrícula hexagonal. Se profundizó más de dos kilómetros y luego se depositaron, en cada pozo, sofisticados detectores de fotones. Cuando el agua volvió a congelarse a su alrededor, los miles de detectores quedaron enterrados en la profunda oscuridad del hielo. Y sus ojos electrónicos y ultrasensibles comenzaron a escudriñar la oscuridad más absoluta en busca de minúsculos destellos de luz, los producidos por los neutrinos más desafortunados, esos que mueren al ir a chocar contra un núcleo, mientras atraviesan la gruesa capa de hielo.

La colisión de alta energía produce enjambres de partículas cargadas, a veces acompañadas por *muones*, una especie de electrones mucho más pesados, que se emiten en la misma dirección que los neutrinos y se encuentran de repente viajando más rápido que la luz en ese medio. La única forma de evitar lo embarazoso de la situación es comportarse como los aviones de combate cuando sobrepasan la barrera del sonido. Pero en lugar de salirse con un estruendoso *bang* acústico, los muones se limitan a emitir pequeños destellos de luz ultravioleta distribuidos sobre un característico cono. Un efecto que fue registrado por primera vez en los años cincuenta por Pável Alekséyevich Cherenkov, y que de él ha tomado su nombre.

Así pues, cuando un neutrino interactúa, los detectores de IceCube registran una secuencia de señales características que les permiten medir al mismo tiempo la energía y la dirección de la que proviene. Esta es la información más importante, ya que nos permite remontarnos a la fuente emisora de esos mensajeros delicados y ligeros. Los neutrinos cósmicos vuelan en línea recta, imperturbables, haciendo caso omiso a la distribución de masa y energía por la que cruzan, totalmente insensibles a los campos magnéticos que ocupan las galaxias e incluso a los espacios intergalácticos. Revelarlos significa identificar la galaxia desde la que provienen y empezar a entender qué mecanismo los ha generado.

Desde que comenzó a recopilar datos, IceCube registró de inmediato algunos acontecimientos espectaculares, que sorprendieron a todos: neutrinos de energía aterradora, cientos de veces superior a cuanto puede producirse en el LHC, el acelerador más potente del mundo. Nadie, hasta entonces, podía haber imaginado que neutrinos tan energéticos vagaran por el universo e

inmediatamente se lanzó el desafío de comprender qué monstruoso acelerador cósmico podría producir estas partículas.

El 22 de septiembre de 2017, los detectores de IceCube registraron la interacción de un neutrino de 300 TeV, del que nació un muon que dejó un espectacular rastro luminoso detectado por cientos de fotosensores. Los datos eran decididamente claros y la dirección de vuelo del neutrino apuntaba hacia una galaxia distante, conocida por ser muy activa en la emisión de radiaciones de longitud de onda variable. Se encuentra a unos cuatro mil millones de años luz de distancia, próxima a la constelación de Orión, el gran arquero que reluce en el cielo boreal, memoria perenne del cazador gigante asesinado por la mano de Artemisa.

Cuenta el mito que Apolo, contrariado por la atracción que sentía su hermana por aquel mortal tan hábil en la caza, la empujó con engaños a matar a su amado. Zeus, compadecido por las lágrimas de su hija y las inconsolables quejas del fiel sabueso Sirio, compañero de tantas batidas, los acogió a los dos entre las constelaciones más espléndidas. Y en el cielo, sobre nuestras cabezas, todavía podemos observarlos hoy, cazando juntos y lanzando flechas en dirección a Tauro.

Pero en este caso, Orión ha lanzado hacia nosotros otras flechas, más sutiles y penetrantes que aquellas con las que abatía ciervos y jabalíes. Los neutrinos detectados por IceCube provienen de la galaxia TXS 0506+056, una de esas complicadas siglas a las que los astrónomos tienen que recurrir para dar nombre a la infinitud de galaxias que pueblan la bóveda celeste. Sin embargo, a los físicos no les gustan las complicaciones y la galaxia fue rebautizada inmediatamente con un nombre que contiene las tres consonantes básicas, pero que es mucho más fácil de recordar: Texas Source.

Los investigadores que manejan los datos tomados del experimento lanzan una alerta a todos los observadores del mundo: «Científicos del planeta Tierra, volved la mirada hacia Texas Source; allí está pasando algo». El aviso llega a docenas de observadores que dirigen sus instrumentos hacia la dirección indicada, y ahí viene lo bueno. En los días siguientes otros dos aparatos, especializados en la detección de fotones de alta energía, registran rayos gamma que provienen, indudablemente, de la misma fuente. No cabe la menor duda de que Texas Source está montando una buena.

Desde hace algún tiempo se sabía que TXS 0506+056 era un objeto muy extraño. Se trata de una gigantesca galaxia elíptica dominada por un enorme agujero negro que gira rápidamente sobre sí mismo. Este monstruo tiene una masa gigantesca, evaluable en cientos de millones, si no miles de millones, de masas solares y está adornado de un enorme disco de acrecimiento y dos gigantescos chorros polares. Uno de estos está dirigido hacia la Tierra, por lo que se trata de un blazar.

En las espantosas aceleraciones que se producen en Texas Source, además de los neutrinos, se generan rayos gamma, fotones de altísima energía que activan las alarmas de los instrumentos de Fermi y Magic, los dos observatorios más sensibles, uno en órbita alrededor de la Tierra, y el otro con sus dos telescopios situados en la isla de La Palma en las Canarias.

Es esa la señal con la que todos soñaban. Una coincidencia tan espectacular no puede ser casual: si también se emiten neutrinos junto con fotones, eso supone la prueba de que el gigantesco artilugio alimentado por el agujero negro de la Texas Source acelera los protones, exactamente igual que un LHC de tamaño monstruoso.

Así empezamos a entender uno de los mayores misterios de la física moderna y quienes nos hacen este regalo son galaxias lejanas, alimentadas por gigantescos agujeros negros.

Con esto termina el sexto día, han transcurrido los primeros cuatro mil millones de años y el universo está poblado ahora por una infinidad de galaxias. Entre estas hay una, muy pacífica, con un núcleo galáctico definitivamente sosegado, en el que algo está a punto de suceder.

## Día 7

### Un bullir de formas complejas

En la Vía Láctea, hace miles de millones de años que todo gira de manera estable alrededor del núcleo central. La fase turbulenta de la vida de la nueva galaxia, su tormentosa adolescencia, hace mucho tiempo que ha terminado.

Sagitario-A\*, después de haber engullido todas las estrellas, el gas y el polvo que rodeaban el núcleo originario, duerme plácido y saciado, como Polifemo en su cueva, el monstruo que Ulises volvió inofensivo mediante el vino. El disco de acrecimiento del gran agujero negro, que ya no se alimenta desmedidamente, se ha reducido de tamaño y los chorros relativistas con los que irradiaba en el espacio que lo rodeaba, haciendo estragos en los sistemas y las estrellas en formación, han ido desapareciendo poco a poco. Incluso las galaxias gigantes más próximas, los primos más cercanos de la familia que conforma el grupo local, Andrómeda y el Triángulo, han dejado de exhibirse mediante peligrosos fuegos artificiales. Los rayos gamma emitidos por los núcleos activos de las galaxias más distantes son bastante inofensivos. Ahora, en la calma que se ha instaurado, ya no interrumpida por la sucesión de catástrofes que caracterizó el nacimiento de la galaxia, hay tiempo para que se desarrollen sistemas organizados cada vez más complejos.

Han pasado más de nueve mil millones de años cuando el último día, el séptimo, da comienzo. Algo está sucediendo en una sección secundaria en comparación con las cuatro grandes estructuras que forman la inmensa espiral. Entre los grandes brazos de Perseo y de Sagitario, justo en el punto donde se bifurca un pequeño brazo llamado de Orión, hay un enjambre de formaciones estelares muy jóvenes, que encuentran alimento en gigantescas nubes moleculares. En esa zona, generaciones de estrellas gigantescas, que se han sucedido en los miles de millones de años precedentes, han dispersado todo el material acumulado en sus enormes hornos nucleares.

Al explotar como supernovas, han diseminado los grandes espacios de polvo y gas: las nubes moleculares. Contienen principalmente hidrógeno y helio, pero hay trazas de todos los elementos: carbono, nitrógeno, oxígeno,



silicio, y así sucesivamente hasta el hierro. Algunas grandes estrellas, transformadas en estrellas de neutrones, al entrar en colisión entre sí han enriquecido las nubes con pequeñas concentraciones de los elementos más pesados también, incluyendo plomo o uranio.

Mientras conservan sus altas temperaturas y siguen expandiéndose, rememorando las grandes explosiones que las causaron, nada puede conseguir que estas inmensas nubes se agreguen. Pero a medida que se enfría y disminuye su velocidad, la gravedad prevalece sobre el impulso de expansión y construye centros de agregación cada vez más masivos alrededor de los grumos de materia. De esta manera se forma un gran disco de gas y polvo que gira alrededor del centro, donde se adensa el grueso de la masa, especialmente hidrógeno. Dentro de la galaxia se forma una réplica en miniatura de la propia galaxia: una parte de la enorme nube colapsa bajo la fuerza de su misma gravedad y forma una nebulosa solar en cuyo centro va naciendo una estrella, mientras a su alrededor se configura una especie de disco de acrecimiento, en el que se distinguen otros centros de agregación, más pequeños, distribuidos en los distintos anillos: un disco protoplanetario.

De repente, el Sol empezará a brillar y se formarán los grandes planetas gaseosos. A continuación, más despacio y siguiendo un recorrido más accidentado, se agregarán los planetas rocosos, de órbitas más internas.

Uno de estos será particularmente afortunado. La catastrófica colisión con otro planeta en formación, en lugar de devastarlo para siempre y romperlo en mil pedazos, le regalará un gran satélite, que contribuirá a estabilizar su órbita en los miles de millones de años venideros. Recibirá, como los demás, la embestida de una lluvia de cometas y meteoritos que lo enriquecerán con elementos importantes y todo esto, junto con la actividad volcánica que lo acompañará, desempeñará un papel decisivo para su posterior desarrollo.

El gran planeta rocoso tiene las dimensiones adecuadas para producir una fuerza de gravedad suficiente como para permitirle recubrirse con una atmósfera gaseosa; su núcleo de metal fundido lo dotará de un campo magnético y estos dos elementos servirán de escudo protector contra las muchas amenazas que acechan en las profundidades del cosmos.

Orbitará lo suficientemente cerca del Sol para recibir la energía necesaria para salir del frío cósmico que lo rodea, pero sin que llegue a niveles tales que generen un calor incompatible con muchas reacciones químicas. El agua, que cubrirá la mayor parte de su superficie, permanecerá en estado líquido durante miles de millones de años, y será en sus profundidades donde nazcan formas químicas muy particulares. Estructuras simples pero dotadas de un equipamiento genial, que potencia su capacidad de adaptación y desarrollo: sistemas químicos que incorporan y transforman moléculas elementales en estructuras más articuladas; son las primeras formas de vida, que pueden evolucionar y reproducirse en respuesta a las condiciones ambientales.

Ya se ha dado el paso más importante. Han hecho falta mil millones de años aproximadamente desde la formación del sistema solar, y en el planeta Tierra se están desarrollando organismos vivientes primordiales. A partir de este momento, lenta pero inexorablemente, las formas químicas complejas, capaces de adaptarse a los cambios y colonizar zonas cada vez más vastas del planeta, se sucederán unas a otras alternando períodos de gran éxito, con la eclosión de una u otra especie, con épocas de crisis y extinciones masivas.

La organización de la vida ofrece tales ventajas que dará lugar al desarrollo de formas cada vez más complejas, desde organismos unicelulares a plantas y animales, incluyéndonos a nosotros. Estamos casi al final de la historia cuando, en algunos extraños simios antropomórficos, con una intensa tendencia a las relaciones sociales, la selección natural desarrollará un nuevo instrumento que les proporcionará una ventaja evolutiva adicional: la capacidad de imaginar, de poseer una visión del mundo y cierta forma de conciencia de sí mismos. Desde entonces, esta extraña especie animal se extenderá por todos los rincones del planeta y se equipará con herramientas cada vez más complejas para construir una visión del mundo cada vez más sofisticada, organizando su gran relato de los orígenes a su alrededor.

Acaba el séptimo día y la génesis termina cuando han pasado 13 800 millones de años.

## EL SOL Y SUS VAGABUNDOS

De repente, una porción de la gran nube molecular empieza a colapsar alrededor de un área de densidad más elevada que las demás. Estamos en el brazo de Orión, una tranquila fracción de la galaxia, a una distancia segura del núcleo que, aunque menos turbulento que en un principio, no deja de ser una región en la que, periódicamente, se producen desbarajustes.

La gravedad hace que hidrógeno, gas y polvo converjan en la región donde la concentración es máxima y todo comienza a orbitar alrededor del centro de atracción. A causa de la conservación del momento angular se forma un enorme disco plano en cuyo interior la región central de mayor densidad sigue creciendo. En el ojo de esta suerte de enorme vórtice ciclónico se concentra principalmente hidrógeno molecular; en el centro del disco, aplastado por la atracción gravitacional que no deja de crecer, se forma un cuerpo esférico gigantesco, en cuyo interior se desencadenan las primeras reacciones de fusión termonuclear: ha nacido una nueva estrella.

Las dimensiones del Sol son lo suficientemente grandes como para producir temperaturas superficiales de muchos miles de grados y lanzar energía a grandes distancias. Pero es una estrella enana, y su pequeño tamaño le ofrece la ventaja de consumir lentamente el hidrógeno ionizado y comprimido del que se compone. El nuevo astro podrá seguir brillando durante diez mil millones de años. Un enorme lapso de tiempo, suficiente para permitir el desarrollo de un sistema estable de planetas y satélites que tendrán a su disposición, a su vez, miles de millones de años que enmarcarán procesos de transformación muy lentos.

La palabra *planeta* se deriva de *planetas asteres*, estrellas vagabundas, como llamaban los griegos a los astros que se desplazaban en el cielo nocturno con respecto a las estrellas fijas. Se consideraban estrellas errantes el Sol, la Luna y los cinco cuerpos celestes visibles a simple vista: Marte, Mercurio, Júpiter, Venus y Saturno. Los siete planetas no tardaron en ser asociados con algunas de las principales divinidades, cuyas características tomarán prestadas. El ardiente y reluciente Mercurio que, por cruzar el cielo muy rápido, se convertirá en el ágil mensajero de los dioses; el corusco Marte, con esa coloración turbia y sanguínea que exhibe cuando está bajo en el horizonte, será el dios de guerra, y así sucesivamente. Los siete definirán la secuencia de los días de la semana; del griego se trasvasarán al latín y de ahí a las lenguas romances y a casi todas las demás lenguas europeas en general, para llegar hasta nuestros días intactos. Los habitantes del planeta Tierra, durante milenios, han conservado siempre su apego a los «vagabundos» hasta el extremo de usar sus nombres para marcar el paso del tiempo.

Pero ahora, cuando el Sol comienza a brillar en el centro de la nebulosa, los distintos anillos de materia que lo rodean se van agregando a su vez alrededor de las zonas donde la densidad es máxima. Así se van formando los cuatro gigantes gaseosos, que ocupan las órbitas exteriores: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Todo sucedió en un lapso temporal relativamente corto, unos cien mil años. Hará falta mucho más tiempo, decenas de millones de años, para que se agreguen los planetas rocosos.

En las primeras fases de su vida también el Sol, como todas las otras estrellas, da espectáculo. Su luminosidad y las radiaciones que emite son mucho más intensas que las de hoy. Calentados por las altas temperaturas e impulsados por el viento de partículas cargadas producidas por las tormentas magnéticas del Sol, el hidrógeno y los demás componentes ligeros de la nebulosa originaria son barridos de las órbitas más cercanas. Empujados hacia las zonas ocupadas por los grandes gigantes gaseosos, son capturados e incorporados a sus grandes masas. Mientras la nebulosa protoplanetaria empieza a volverse ordenada y transparente, la parte interna del sistema solar acaba por enriquecerse progresivamente gracias a los elementos más pesados.

Los granos de polvo que orbitan en las zonas más cercanas al Sol, y que la radiación solar y el viento no pueden alejar de allí a causa de su masa, chocan entre sí y empiezan a agregarse en cuerpos cada vez más grandes. Cuando alcanzan dimensiones del orden del kilómetro, la atracción gravitacional que ejercen a su alrededor forma agregaciones cada vez más importantes, hasta producir una infinidad de cuerpos rocosos. Son los llamados *planetesimales*, o planetas infinitesimales, las semillas de las que nacerán los planetas, satélites y asteroides rocosos de nuestro sistema solar.

Mercurio, Venus, Marte y la Tierra, los planetas rocosos dentro de la órbita de Júpiter, nacen de la agregación y fusión mediante colisiones caóticas de miles de estos pequeños cuerpos celestes. A medida que aumentan de tamaño, la parte más pesada del material, generalmente hierro y níquel, se concentra en el corazón del planeta en forma sólida; la presión debida a la gravedad produce allí temperaturas de miles de grados que vuelven líquido el núcleo metálico externo. Rocas y elementos más ligeros flotarán por encima concentrándose en los estratos superiores; las conchas de roca líquida recubrirán el núcleo de metal, mientras que, con el enfriamiento del conjunto, va formándose lentamente, en la superficie, una corteza rocosa sólida, cada vez más gruesa.

De esta manera, hace aproximadamente cuatro mil quinientos millones de años, se forma un sistema solar muy complejo: ocho planetas, decenas de planetas enanos, cientos de satélites, miles de cuerpos celestes de dimensiones subplanetarias y más de cien mil asteroides. Entre los ocho planetas, hay uno que ocupa una posición particularmente privilegiada y a la que sonrió la suerte de manera flagrante.

## AFORTUNADAMENTE, TEA NOS ARRASÓ

Sucede a veces, incluso en nuestras propias vidas, que auténticos golpes de suerte se nos presentan bajo la apariencia de desafortunados inconvenientes. Pasajeros desesperados por haber perdido el vuelo debido a una demora en llegar al aeropuerto se enteran más tarde de que, por pura casualidad, se han librado de un accidente aéreo que no ha dejado supervivientes. E incluso, de manera más trivial, una derrota, un fracaso profesional que nos obliga a cambiar de trabajo, o una terrible desilusión amorosa que acaba con una relación importante; también en estos casos, tal vez con la perspectiva de los años, miramos hacia atrás y comprendemos que lo que parecía ser el período

más triste de nuestra existencia marcó en realidad un punto de inflexión, abrió nuevos caminos o nos permitió conocer a la persona de la que nos enamoramos perdidamente.

Pero nada es comparable a lo que ocurrió con nuestro planeta, justo en su primer período de vida. Han pasado aproximadamente cien millones de años desde que la tercera órbita interior del Sol fue ocupada por un gran planeta rocoso. Para él usaremos el nombre de Gaia, el antiguo nombre de la Tierra. Al igual que los demás, se ha formado por agregación progresiva de planetesimales y ha pasado por períodos de grandes turbulencias, caracterizados por colisiones y grandes perturbaciones gravitacionales. Ahora lo peor parece pasado, cuando, por el contrario, una amenaza terrible está esperándolo.

Otro cuerpo celeste, más pequeño que Gaia y aun así de considerable tamaño, posee una órbita que lo lleva inevitablemente a colisionar con la nuestra. Se verifica así el escenario de pesadilla imaginado en la película *Melancolía*, estrenada en 2011 y dirigida por el controvertido director danés Lars von Trier.

El planetoide que está a punto de embestirnos tiene una masa similar a Marte y lo llamaremos Tea. Imponentes fuerzas de marea devastan los dos cuerpos antes incluso de que se produzca la colisión. Después tiene lugar el choque, de un impacto devastador. La energía desarrollada en la colisión hace que los dos cuerpos gigantes queden fundidos durante mucho tiempo, con ondas de choque que los recorren rápidamente; después, una parte de Tea, mezclada con material de Gaia, se libra del abrazo mortal y trata de escapar, pero queda atrapado para siempre en el campo gravitacional de Gaia: nació así nuestra Luna. Como en el antiguo mito, Tea, la titánide, la diosa por excelencia, hija de Urano y Gea, dio origen a Selene, «la resplandeciente».

A su vez, Gaia, después de absorber el trauma del impacto y de la separación de la Luna, recuperó su forma esférica, aumentó aún más sus dimensiones y se convirtió definitivamente en el planeta Tierra. La hipótesis de la colisión catastrófica primordial en el origen del sistema Tierra-Luna se ha visto confirmado por numerosos hallazgos en el análisis de rocas lunares recogidas durante las diversas exploraciones de nuestro satélite. En algunos isótopos de oxígeno que se encuentran en su interior, ha quedado una especie de huella fósil del caluroso abrazo primordial que unió a la Tierra a su satélite.

La Luna no solo sirve para iluminar nuestras noches, para hacer soñar a los enamorados, para inspirar a músicos y poetas. Este extraño satélite, tan anómalo en comparación con los otros que pueblan a centenares el sistema solar, desempeña un papel fundamental para estabilizar la órbita de nuestro planeta. El sistema Tierra-Luna actúa como una especie de giroscopio estabilizador en el movimiento de revolución alrededor del Sol.

La Tierra es el único planeta rocoso que tiene un satélite de grandes dimensiones, con un diámetro de 3500 kilómetros, aproximadamente un cuarto del terrestre. Mercurio y Venus no tienen satélites, mientras que Fobos y Deimos, las dos minúsculas lunas de Marte, son pequeños elipsoides de diámetros de 22 kilómetros el uno y de 12 kilómetros el otro. Los tres planetas rocosos compañeros nuestros resultan expuestos a perturbaciones gravitacionales debidas al Sol y a otros cuerpos más masivos del sistema solar y el ángulo entre su eje de rotación y el plano de la órbita es inestable. A escalas de tiempo de millones de años pueden sufrir cambios importantes, cambiar incluso en decenas de grados y pasar por períodos de mutaciones caóticas.

Lo mismo nos sucedería a nosotros si no existiera la Luna, tan pesada y tan cercana como para mitigar las perturbaciones que modificarían nuestro eje de rotación. El ángulo que forma con el plano de la órbita queda estabilizado por la presencia de la Luna en variaciones del orden de un grado. Si la inclinación de la Tierra con respecto al Sol permanece fija, eso hace posible que se configuren zonas climáticas relativamente estables en escalas largas de tiempo, lo que favorece el desarrollo de los lentos procesos de formación de sistemas complejos. Si alguien volviera a plantearse la leopardiana pregunta a la Luna del pastor errante de Asia: «¿Qué haces, luna, en el cielo? Dime, ¿qué haces, silenciosa luna?», podría recibir una respuesta acaso no muy poética, pero ciertamente bastante inesperada: «Sin mí no tendrías estaciones ni habría quizá vida en la Tierra; ni tampoco pastores errantes que, contemplándome, me preguntaran nada». El hecho de que Tea nos haya devastado fue una auténtica suerte para nosotros.

Y no ha sido la única vez que la fortuna nos ha sonreído. La otra ha sido tener cerca al gigantesco Júpiter. Este enorme planeta gaseoso, campeón por tamaño del sistema solar, tiene un diámetro de 143 000 kilómetros y pesa trescientas veces más que la Tierra. Es tan gigantesco que incluso hoy debatimos si ha de considerarse un planeta o una pequeña enana marrón. Cuando la masa inicial de la esfera de gas no es lo suficientemente grande, la presión y la temperatura del núcleo no pueden desencadenar fusiones termonucleares; con todo, el cuerpo está tan caliente que irradia en cualquier caso una considerable cantidad de energía. La frustrada estrella se convierte en un astro tibio que irradia a una temperatura mucho más baja; su luz no es energética como la azul, la blanca o la amarilla, pero tiende al rojo oscuro y se la denomina enana marrón.

Sin embargo, Júpiter, estrella frustrada, tiene una masa tan imponente que ha condicionado el desarrollo de gran parte del sistema solar. De los primeros en haberse formado, ha impedido con su excesiva fuerza de gravedad la formación de un planeta rocoso en el llamado *cinturón de asteroides*: una vasta región comprendida entre Júpiter y Marte. Los ha empujado en grandes

cantidades hacia el espacio exterior y ha impedido que otros se consolidaran en un cuerpo masivo. En esa zona orbitan todavía miles de escombros rocosos, residuos de los que la atracción del voluminoso vecino ha perturbado catastróficamente, obligándolos a constantes colisiones cada vez que intentaban organizarse como planetas. La fallida formación de un quinto planeta rocoso ha dejado más material, estructurado en planetesimales, para la formación de los planetas interiores, incluida la Tierra. Nuestro planeta pudo adquirir así dimensiones tales como para poder retener de manera estable su preciosa atmósfera.

El gigante bueno, Júpiter, y junto a él Saturno, adornado con anillos, actúan como centinelas para la protección de los planetas interiores. Gracias a su masa desvían hacia ellos, englobándolos, asteroides y cometas peligrosos. Como gigantes guardaespalda, nos protegen del riesgo de encuentros demasiado cercanos con objetos muy peligrosos. No siempre lo consiguen, como sucedió hace sesenta y cinco millones de años, cuando un meteorito de 10 kilómetros de diámetro, rico en iridio, logró alcanzar nuestro planeta. Pero acontecimientos de semejante poder destructivo, gracias a su presencia, se han vuelto muy raros para nosotros.

El gran escudo de Júpiter nos protege de hechos catastróficos que podrían poner en peligro la supervivencia de las delicadas formas de vida que se desarrollarán en el planeta Tierra. Por eso estamos en deuda con el gran planeta, Júpiter el regulador, el pacificador, que, no por casualidad, los griegos identificaron con Zeus, capaz de moderar los conflictos entre los dioses.

## LA CUNA DE LA COMPLEJIDAD

El secreto de la Tierra está escondido en lo más profundo de su corazón. Sobre el núcleo sólido y la carcasa de metal fundido fluctúa un grueso estrato de roca líquida. Desde los inicios de la formación de planetas, hierro y otros metales pesados se diferenciaron de los componentes más ligeros. Los primeros se adensaron en las capas internas, mientras que los demás se agregaron para formar una gruesa capa rocosa externa. El calor de la contracción gravitacional derritió toda la parte interna, mientras que, debido al enfriamiento, se creó una delgada corteza rocosa en la superficie que flota sobre un mar de rocas fundidas. Los procesos de desintegración radiactiva de los isótopos inestables alimentan, con su energía, el calor del núcleo y

contribuyen a mantener alta la temperatura a una escala de miles de millones de años.

Las grandes placas rocosas de la corteza están en continuo movimiento, impulsadas por la energía de las enormes celdas convectivas que se forman en el manto subyacente de roca fundida. En los titánicos choques resultantes se originan deformaciones que dan lugar a montañas y valles profundos que serán llenados por el agua de los océanos. A través de las grietas que se crean llega a la superficie el magma incandescente que ruge bajo la corteza. El dios del fuego, Vulcano, el herrero, trabaja incesantemente en su gran taller subterráneo para construir un entorno que no tardará en volverse maravilloso.

En su fase inicial de formación, la Tierra estará caracterizada por fenómenos volcánicos de dimensiones e intensidad aterradoras. Este volcanismo paroxístico llevará a la superficie un flujo continuo de sustancias químicas disueltas en los gases y en las rocas fundidas que emergen para constituir una nueva corteza. Se formará lentamente una atmósfera compuesta principalmente por vapor de agua, nitrógeno y dióxido de carbono, que el campo gravitacional del gran planeta rocoso está en condiciones de retener.

El agua ya estaba presente en el polvo de la nube protoplanetaria y sus moléculas se mezclaron con las que formaron las rocas del manto terrestre. Una gran parte de ella se perderá por evaporación durante las fases más calientes de la formación del planeta, pero las continuas erupciones volcánicas la llevarán de vuelta a la superficie en forma de vapor. La mayor parte del agua del planeta proviene del flujo incesante de asteroides y cometas que siguen embistiéndolo. El bombardeo continuo de meteoritos de naturaleza carbonada, ricos en agua, y esos auténticos icebergs cósmicos que son los cometas enriquecerán la Tierra con el nuevo elemento.

Cuando el universo celebra sus diez mil millones de años, grandes océanos cubren la mayor parte de la superficie de nuestro planeta. Las erupciones volcánicas alimentan la alta concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, cuyo efecto invernadero permitirá mantener en estado líquido la mayor parte de los océanos por períodos muy largos de tiempo.

Fenómenos análogos a los que han afectado a la Tierra llevaron agua a muchos cuerpos del sistema solar. En forma de vapor, está presente en gigantes gaseosos como Júpiter, Saturno y Urano, y también en las nubes que cubren Venus. Hay hielo en los casquetes polares de Marte, mientras que Europa, el más pequeño de los satélites de Júpiter descubiertos por Galileo, está recubierto por un inmenso océano helado de más de 100 kilómetros de profundidad, por debajo de cuya capa superficial se cree que hay agua líquida en gran abundancia. Titán, el gran satélite de Saturno, contiene mucha más agua que la Tierra, pero ahí también, por lo que sabemos, en forma de hielo; hay agua en estado líquido, probablemente, en Encélado, otra luna del gigante de los anillos.



El corazón incandescente de la Tierra nos da otro regalo que será muy importante para desarrollos posteriores. Los estratos concéntricos de hierro líquido, que giran a diferentes velocidades alrededor del núcleo sólido interno, arrastran con ellos partículas cargadas y producen una enorme corriente circular de la que nace el sutil campo magnético que envuelve el planeta. Esta invisible estructura, que desvía hacia los polos las partículas cargadas, lo protegerá de los efectos más destructivos de la radiación cósmica que podría romper fácilmente los vínculos de las organizaciones químicas más complejas. A estas alturas, tenemos todos los ingredientes para que dé comienzo una cadena de acontecimientos que nos atañen muy de cerca.

Carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, fósforo y azufre, los componentes básicos de las principales moléculas orgánicas, están presentes en el universo por doquier y eran abundantes sin duda también en los entornos de la Tierra primordial. A partir de estos elementos, los precursores de las principales biomoléculas, que volveremos a encontrar en los seres vivos, podrán ser producidos en el fondo de los océanos, en las proximidades de los volcanes submarinos o cerca de manantiales hidrotermales; es hacia estos entornos tan especiales, en los que el agua a alta temperatura y enriquecida con sales se mezcla con gases de distintas clases, donde hay que dirigir la mirada para asistir al nacimiento de las primeras estructuras biológicas. Se trata de reacciones químicas que transformaron el monóxido de carbono, el amoníaco y el formaldehído en aminoácidos, lípidos, polisacáridos y ácidos nucleicos; y pudieron trabajar durante el tiempo suficiente para construir las primeras proteínas y organizar la información en las formas más primitivas de ADN.

También es necesario considerar la hipótesis de que bacterias u otros organismos vivientes muy simples, capaces de sobrevivir en condiciones extremas de temperatura pudieran llegar a la Tierra a través de los asteroides y los cometas que la bombardearon sin cesar durante los primeros mil millones de años. Incrustadas en las rocas de los detritos o en los polvos mezclados con hielo de las cometas, formas de vida primordial, originadas en otros lugares y proyectadas en el espacio por grandes colisiones o gigantescas erupciones, podrían haber diseminado con material viviente todo el sistema solar. Si las primeras formas de vida hubieran llegado a nuestro planeta desde el espacio, habrían encontrado sin duda un ambiente favorable.

Lo cierto es que hace tres mil quinientos millones de años, bajo el manto protector del agua de los océanos, al abrigo del bombardeo de rayos ultravioleta, comienzan a desarrollarse las primeras estructuras biológicas elementales. Se trata de cianobacterias, diminutas algas, cuyo desarrollo desencadenará otro cambio extraordinario; son organismos unicelulares que se organizan en pequeños filamentos, con dimensiones inferiores a una milésima de milímetro, y son *procariotas*, es decir, que su patrimonio

genético fluctúa libre dentro de la célula, sin estar protegidos por membrana alguna.

Las cianobacterias son capaces de capturar la luz y transformarla en energía —el proceso que denominamos fotosíntesis— y van perfeccionando este mecanismo, adaptándolo a los diferentes entornos en los que desarrollarán sus colonias.

Esta reacción bioquímica, que a partir del dióxido de carbono y de la luz solar conduce a la síntesis de azúcares y a la liberación de oxígeno, modificó radicalmente el medio ambiente de la Tierra. Al principio, el oxígeno producido por las algas era absorbido por el hierro, que abundaba en el fondo de los océanos. Pero cuando la población de cianobacterias creció desmesuradamente, la parte de oxígeno que el hierro ya no podía absorber emergió de las aguas y se produjo una hecatombe. La composición de la atmósfera terrestre cambió radicalmente, para acabar resultando cada vez más tóxica para todos aquellos organismos que no se habían adaptado a las condiciones ambientales cambiantes. Fue la primera gran extinción de una enorme variedad de formas de vida primordial, pero allanó el camino para el impetuoso desarrollo de nuevas especies.

Hace unos dos mil cuatrocientos millones de años, la Tierra tenía una atmósfera que contenía un pequeño porcentaje estable de oxígeno; para nosotros los humanos el aire habría sido todavía irrespirable, pero el proceso era ya irreversible.

Organismos vivientes herederos de los primeros procariotas desarrollaron un núcleo de protección para el material genético y la ventaja evolutiva que obtuvieron determinó el éxito de los *eucariotas*. La nueva atmósfera parece haber favorecido con su contenido de oxígeno el desarrollo de los primeros organismos multicelulares, cuya aparición sitúan algunos descubrimientos recientes hace dos mil millones de años aproximadamente. A partir de entonces se produce una proliferación de gran variedad de formas biológicas cada vez más complejas, que experimentan diferentes fases de crisis y expansión y, al modificarse, sobrevivieron a terribles extinciones masivas.

Un auténtico espectáculo de nuevas estructuras vivientes tuvo lugar hace unos quinientos millones de años, cuando la Tierra pasó por una fase de calentamiento enorme, probablemente debido a un gigantesco efecto invernadero. Los niveles de anhídrido carbónico del Cámbrico alcanzaron valores aproximadamente veinte veces más altos que los de la era moderna, con una temperatura media del planeta 10 grados superior a la actual. El resultado fue una auténtica explosión de vida, con la aparición de formas vegetales muy variadas y de los primeros vertebrados, de peces y, más tarde, de los grandes reptiles.

Un nuevo cataclismo alteró radicalmente el escenario. Con el impacto de un gran meteorito, hace sesenta y cinco millones de años, el clima

experimentó una profunda transformación a causa del polvo que levantó la colisión. Un frío repentino envolvió la Tierra, causando la extinción masiva de los grandes dinosaurios, mientras que brindó una oportunidad inesperada para los pequeños mamíferos que lograron sobrevivir y ocuparon todos los nichos ecológicos que quedaron libres.

De uno de estos, en una zona de gargantas y sabanas en el Cuerno de África, hace unos pocos millones de años, una población de primates se diferenciará de las especies que la precedieron por una marcada aptitud social y una habilidad, hasta entonces inédita, para imaginar, construir y emplear herramientas. Esta chispa de autoconciencia, que se traduce en diseño, visión y construcción de utensilios, supondrá una enorme ventaja evolutiva para los primeros simios antropomorfos. Las generaciones posteriores a los primeros homínidos no tardarán en colonizar todos los hábitats del planeta, adaptándose rápidamente a las diferentes condiciones ambientales.

Así que hemos aquí. En un abrir y cerrar de ojos, el relato ha llegado hasta nosotros.

## EXOPLANETAS

La idea de que el universo podría albergar una multitud de mundos habitados se remonta a los filósofos presocráticos de Jonia. La intuición se atribuye a Anaximandro por Mileto, un genial discípulo de Tales, quien también fue el primero en proponer la revolucionaria idea de que la Tierra flotaba en el espacio, sin caer y sin estar apoyada en nada.

El concepto de los *infinitos mundos* será abordado primero por los pitagóricos y más tarde, con gran lucidez, por Epicuro y sus seguidores de la época romana, empezando por Lucrecio. Durante siglos, la idea quedará sofocada por el aristotelismo predominante, para luego resurgir tímidamente con Guillermo de Ockham y explotar por último en el Renacimiento con Nicolás de Cusa y Giordano Bruno. Fue el filósofo de Nola quien sembró en toda Europa, con gran determinación, la idea de los *innumerables Soles y Tierras*; fue probablemente esta actividad pública de transmisión de ideas peligrosas fuera de los círculos restringidos de especialistas lo que le llevará a su trágico final en la hoguera de Campo de' Fiori.

Hoy, la ciencia ha confirmado las intuiciones de este filón de valientes pensadores y, sin embargo, todavía no sabemos cómo responder a la más simple de las preguntas: ¿hay vida inteligente en algún lugar allá arriba? La

ley de los grandes números nos sugiere que sí, que parece muy probable, pero las pruebas recogidas hasta hoy no son suficientes para llegar a ninguna conclusión.

La situación ha evolucionado rápidamente durante los últimos treinta años, es decir, desde que se han hecho enormes progresos en la búsqueda de *exoplanetas*. Con este nombre nos referimos a los planetas extrasolares, es decir, que orbitan alrededor de una estrella que no es nuestro Sol. Hasta hace poco, se pensaba que el número de estrellas que albergaban planetas era muy reducido. En los últimos años, es decir, desde que las técnicas para su identificación se han refinado, no pasa un mes sin que se anuncien nuevos avistamientos. Hasta ahora han sido descubiertos más de 3700.

Las primeras investigaciones se remontan nada menos que a los años cuarenta. Pero entonces se utilizaban técnicas de observación bastante toscas, como los métodos astrométricos. Debido a las leyes de gravitación, en presencia de un planeta, la estrella-madre realiza también una pequeña rotación alrededor del centro de masa del sistema. Cuanto más masivo es el planeta, mayor es el desplazamiento periódico de la estrella. Por lo tanto, se trataba de buscar pequeñas perturbaciones periódicas en la posición de la madre estrella, pero los resultados fueron decepcionantes.

Las primeras sorpresas llegaron cuando se comenzó a usar la técnica de la velocidad radial, que utiliza el mismo principio, pero emplea mediciones espectroscópicas que permiten una mayor precisión. Se analiza el espectro de emisión luminosa de la estrella y se verifican en el tiempo las líneas correspondientes a las distintas frecuencias. Si la estrella presenta un movimiento orbital causado por la presencia de un planeta, se mide una pequeña variación periódica en la frecuencia de su emisión luminosa debido al efecto Doppler.

Fue así como, gracias a esta nueva técnica, se descubrieron los primeros planetas extrasolares en los años noventa. Pero se trataba de enormes cuerpos celestes, semejantes a nuestro Júpiter. Gigantes calientes, en su mayoría gaseosos, que gravitaban muy cerca de sus estrellas madre y, por lo tanto, tenían una temperatura superficial aterradora.

Este ámbito de investigación recibió un impulso extraordinario desde que se puso en marcha el método de tránsitos, u ocultamiento, gracias al cual resulta posible mantener bajo observación cientos de miles de estrellas al mismo tiempo. Se trata de una técnica basada en fotometría de precisión, es decir, se mantiene bajo control la luminosidad de la estrella y se mide la levísima atenuación de la luz producida por el planeta cuando pasa por delante de ella. También en este caso se requiere que la perturbación sea de naturaleza periódica. La forma característica de la alteración permite medir las dimensiones del planeta y esta información, combinada con la medición de la velocidad radial que da la masa, permite conocer su densidad.

La sensibilidad alcanzada por los instrumentos más modernos es tal que el campo de observación puede extenderse hasta distancias de miles de años luz y pueden identificarse incluso planetas más pequeños que Mercurio.

De esta manera, desde hace algunos años, la búsqueda de nuevas *Tierras* ha producido resultados sensacionales. A estas alturas tenemos claro que hay muchísimas estrellas en nuestra galaxia rodeadas por planetas. Descubrir algunos de ellos, dotados de atmósfera y donde podrían haberse desarrollado formas de vida potencialmente parecidas a las nuestras, es solo cuestión de tiempo.

Si un exoplaneta está rodeado por una atmósfera, la luz de la estrella madre llega hasta nosotros después de haber cruzado sus capas superiores. Este tránsito altera débilmente algunas características de las que podemos obtener información esencial. Con observaciones prolongadas no tardaremos en establecer no solo si algunos planetas poseen una atmósfera, sino si contiene agua, dióxido de carbono o metano. Obviamente, esto no será suficiente para que estemos seguros de que pueda haber formas de vida, tal vez parecidas a aquellas con las que más familiarizados estamos. Con todo, la fuerza de los números es impresionante.

Si consideramos que en cada galaxia hay algo así como cien mil millones de estrellas, debemos imaginar que también hay enormes cantidades de planetas rocosos. Por más que excluyamos aquellos que orbitan en zonas no habitables, nos quedarán muchísimos compatibles con la vida, es decir, capaces de albergar agua en estado líquido.

Como hemos visto, eso no basta para determinar condiciones favorables para el desarrollo de las delicadas y complejas formas de las estructuras biológicas. La masa del planeta desempeña un papel importante, pues debe ser lo suficientemente grande como para retener una atmósfera con gravedad; además, debería contar con un campo magnético para protegerlo de la radiación cósmica; ayuda mucho, por último, tener una órbita estable y vivir en zonas de la galaxia lejos de las grandes catástrofes. En todo caso, lo más importante es que haya tiempo, es decir, que algunas condiciones de estabilidad duren miles de millones de años.

Hace algún tiempo, Kepler, una sonda de la NASA que toma su nombre del gran astrónomo alemán, anunció el descubrimiento de 1284 nuevos planetas extrasolares. Un grupo de astrónomos belgas que trabajaban con los datos del observatorio La Silla, en Chile, identificaron por su parte Trappist-1, un minisistema solar que orbita alrededor de una enana roja, un pequeño Sol que solo se encuentra a 39,5 años luz de nosotros, en la constelación de Acuario. Contiene siete planetas rocosos, algunos realmente parecidos a nuestra Tierra y, entre ellos, tres que se hallan en la llamada *zona habitable*, es decir, a una distancia tal de la estrella madre como para que se den temperaturas similares a las que tenemos aquí. Si hubiera agua, esta podría formar lagos y océanos,

como los que tan comunes son en nuestro hermoso planeta. Ahora que sabemos hacia dónde mirar, podemos tratar de comprender mejor todas las características y comprobar quizá si alguno de estos planetas tiene atmósfera.

Según nuestros conocimientos, Trappist-1 es decididamente demasiado joven para contener formas de vida, dado que el pequeño sistema solar tiene solo cuatrocientos millones de años, pero estamos justo al comienzo de una larga serie de descubrimientos. La cuenta atrás ya ha comenzado. Dentro de unos años, cuando consigamos recopilar los primeros datos inequívocos y se resuelvan las últimas dudas, se abrirá un doble desafío: por un lado, el de absorber esa auténtica conmoción cultural; por otro, por qué no, por más que las distancias sean enormes, el de buscar tecnologías adecuadas para ponernos en contacto o incluso llegar a esos nuevos mundos. Una vez más, la ciencia avanza a pasos agigantados y paradigmas que parecían inmutables cambian de repente.

Pero ahora volvamos a nuestro relato de los orígenes. Que llega a su conclusión cuando ya han pasado 13 800 millones de años desde que arrancó; acaba el séptimo día en el preciso momento en el que uno de nuestros lejanos ancestros se pone de pie y comienza su relato, y los demás se acomodan en un círculo, hechizados, para escucharle.

## Lo que nos hace humanos

Nadie sabrá nunca cuándo sucedió exactamente, ni nos resultará posible entender quién fue el primero. No hay esperanza de poder reconstruir el lenguaje que utilizó, ni mucho menos el mensaje que quiso transmitir al pequeño grupo: tal vez se celebrara un momento de euforia y alegría colectiva, o quizá se buscara consuelo después de una terrible desgracia.

Lo único que sabemos a ciencia cierta es que alguien, en determinado momento de nuestra historia, empezó a contar historias. Es indudable que tuvo que ser un individuo más original que los demás, que quizá sufriera alguna patología psíquica, o simplemente más inquieto, que empezó a engarzar palabras de manera sorprendente. Solo podemos imaginarnos la escena: dentro de una cueva poco iluminada, un clan familiar de diez a quince individuos sentados alrededor de él, o de ella, que descubre el poder de fascinar a los demás, de unirlos recurriendo a un hilo encantado de palabras. Una cadena de expresiones empleadas en un contexto nuevo, liberadas de su función utilitaria, que vuela por el aire para convertirse en canción, poesía, conocimiento colectivo. Palabras rituales que adquieren un profundo valor simbólico y hechizan a todos.

### LA CONSTRUCCIÓN DE LO SIMBÓLICO

Los hallazgos y descubrimientos que se van sucediendo desde hace décadas sitúan entre los neandertales las primeras manifestaciones de un universo simbólico. Estamos hablando de una especie cuya presencia en Europa está atestiguada cientos de miles de años antes de la llegada de los *sapiens*, hace unos cuarenta mil años.

Según parece, ambas especies proceden de un antepasado común, *Homo heidelbergensis*, que evolucionó en África a partir del *Homo erectus* hace más de un millón de años. Después de colonizar el continente, esta especie se extendió por Europa, y tal vez por Asia también, durante un período interglaciar, hace alrededor de seiscientos mil años. De los *heidelbergensis* que permanecieron en África, surgirán los *sapiens*; de los que colonizaron Europa se derivarán los neandertales. Las dos especies, evolucionando en entornos y contextos completamente distintos, desarrollan rasgos diferentes, pero, desde un punto de vista genético, no dejan de estar muy próximos; estamos hablando de parientes cercanos, cuando no de hermanos prácticamente o, como poco, de primos.

Las características físicas de los neandertales han contribuido a crear ciertos prejuicios en su contra. Más corpulentos y robustos que los longilíneos *sapiens*, dieron siempre la impresión de ser más primitivos y menos desarrollados. En realidad, sus rasgos físicos son el resultado de una adaptación extraordinaria a un entorno muy difícil.

La Europa en la que viven los neandertales durante cientos de miles de años se caracteriza por la hostilidad de su clima; se alternan cortos períodos de calor con glaciaciones muy prolongadas que ponen a prueba la capacidad de supervivencia de las especies que lo habitaban. Será la falta de luz solar lo que haga que se desarrolle en los neandertales una mutación genética que los llevará a tener la piel blanca, mucho más clara que la de sus antepasados e incluso que la de nosotros los *sapiens*, cuando nos crucemos por primera vez con ellos, a nuestra llegada de África. Muchos tienen el pelo castaño, rubio o rojizo, y ojos claros; todos tienen cuerpos resistentes, huesos robustos y músculos desarrollados, herramientas todas decisivas para resistir la rigidez del clima y sobrevivir en territorio hostil. Su capacidad craneal es superior a la de los *sapiens*, en otras palabras, tienen un cerebro más grande que el nuestro; pero su cabeza es de forma ovoide, similar a la de una pelota de rugby; la frente es baja y sobresaliente, con un importante hueso occipital; tienen una nariz grande, los arcos supraciliares casi unidos y un marcado prognatismo facial.

En definitiva, la apariencia de los neandertales contrasta con los cánones de belleza que nosotros, los *sapiens*, hemos construido a nuestra imagen y semejanza. Pero si nos encontráramos con uno de ellos hoy, en el metro, vestido con traje y corbata, no nos causaría una sorpresa particular. Entre las infinitas variantes individuales de la población humana podemos encontrar rasgos muy parecidos a los de la antigua especie. Y, sin embargo, parece que fueron precisamente esos primos nuestros, tan burdos en apariencia, quienes consiguieron desarrollar uno de los instrumentos más poderosos para la supervivencia: un universo simbólico.



Los neandertales son poderosos atletas y siguen una dieta alta en proteínas, la única que les permite sobrevivir en los climas helados de la Europa glacial. Para cubrirse y protegerse, emplean pieles de animales que saben desollar y raspar con gran habilidad; tienen manos de poderosa musculatura, con las que fabrican herramientas de piedra o madera muy sofisticadas. Son expertos en convertir el pedernal en instrumentos puntiagudos y afilados, según una técnica de corte que se denominará musteriense y que difundirá por toda Europa los productos de su extraordinaria tecnología: puntas, discos, cuchillas, raspadores y los hermosos bifaces o amigdaloides. Muchos de estos instrumentos, en forma de cuchilla o de punta, se colocarán con betún en utensilios de madera, como las largas lanzas, para hacerlas más letales.

Los neandertales son omnívoros, pero la mitad de su dieta está compuesta por carne; cuando encuentran grandes cadáveres son necrófagos ocasionales, pero sobre todo son cazadores muy hábiles. Utilizan lanzas con puntas endurecidas en el fuego y que superan los dos metros de largo; con estas armas dan caza a grandes animales, incluidos osos y elefantes.

Para organizar partidas de caza mayor, debes contar con un proyecto, un plan compartido con otros cazadores mediante formas sofisticadas de comunicación y jerarquías bien definidas. Hacen falta grupos que emitan gritos y sonidos para reunir a sus presas en un punto predeterminado, o empujarlos hacia la trampa donde los cazadores más robustos y valientes puedan atacarlas, o darles el golpe de gracia sin correr demasiados riesgos. Es probable que todo el clan participara en la cacería, que no dejaba de ser, en cualquier caso, una actividad repleta de peligros. Algunos miembros del grupo sufrían a menudo heridas terribles, que se reflejan en las numerosas fracturas halladas en sus huesos. Los grupos practicaban curas y asistían a los heridos, como lo demuestran individuos con traumas evidentes que sin embargo conseguían llegar en ocasiones hasta edades muy avanzadas para la época; algo que no habría resultado posible sin la ayuda de los miembros más jóvenes y el apoyo de la comunidad al completo.

Con una organización social tan articulada, no sorprende que los neandertales tuvieran una vida cultural compleja. Los hallazgos nos revelan cosas sorprendentes a este respecto: hay indicios del hecho de que enterraban a sus muertos en posición fetal y teñidos de rojo; se han encontrado adornos pintados de ocre, plumas, collares hechos con dientes de ciervo o garras de águila.

El uso de ocre resulta particularmente significativo, porque el rojo es el color de la sangre, y en la sangre se nace y se muere. Al enterrar los cuerpos en posición fetal y teñir los cuerpos de rojo, tal vez se imaginaran que la muerte era un nuevo nacimiento. Se trata de un indicio de alto valor. Una sociedad formada por grupos pequeños y sometida a una constante presión

por las necesidades de la supervivencia dedica un tiempo y una energía preciosos a los cuidados a los cuerpos de los muertos y a organizar rituales de luto. Obviamente, esta civilización considera importante, casi más que la comida, su universo simbólico; hasta el extremo de reputar esencial ese conjunto de rituales y ceremonias que alimentan y dan sustancia a su visión del mundo.

Otros hallazgos parecen reforzar esta hipótesis. En una profunda cueva, a cientos de metros de la entrada, se han descubierto círculos imponentes hechos con trozos de estalactitas. ¿Quién empujó a esos grupos a recorrer distancias tan largas, en la oscuridad de los meandros que se adentran en las vísceras de la tierra? ¿Por qué hacer el esfuerzo de romper y transportar a un lugar predeterminado piedras que pesan decenas de kilos? ¿Y para qué gastar energía en disponerlas en un círculo? Es evidente que a esas actividades se les concede gran importancia; las estructuras circulares tienen una función ritual que tal vez nunca conoceremos, pero que se considera tan fundamental como para dedicarle tiempo y esfuerzo. Algo parecido podemos imaginarnos respecto a objetos de dimensiones menos imponentes, pero cuya función es igualmente intrigante: huesos astillados con signos geométricos, una pequeña flauta de hueso, algunos bifaces tallados en cristal de roca u otras piedras preciosas, jamás utilizadas con fines prácticos, y tal vez vinculadas con ceremonias rituales irremediabilmente perdidas.

Las dudas sobre el universo simbólico de los neandertales se desvanecieron cuando pudimos fechar con precisión algunas pinturas rupestres descubiertas en España. Una docena de ejemplos encontrados en tres cuevas se remontan a hace más de sesenta y cinco mil años, veinte mil antes de la llegada de los *sapiens* al continente europeo. Para completar la sorpresa, en la Cueva de los Aviones, una caverna en el sureste de España, los investigadores encontraron muchas conchas marinas perforadas y decoradas, algunas con trazas de pigmentos rojos, amarillos y negros que datan de hace al menos ciento quince mil años. Se trata, quizá, de los utensilios con los que se preparaban los colores para realizar las pinturas en las paredes, que representaban grupos de animales, puntos, figuras geométricas y huellas de manos, en ocre y negro.

No sabemos exactamente lo que esos signos, pinturas y grafitis de las paredes representaban para ellos. Hay símbolos, una escalera, animales y escenas de caza. Están trazados con habilidad, por manos seguras. Frente a estas pinturas rupestres de nuestros lejanos antepasados predomina la tendencia a interpretarlos en clave naturalista. Lo mismo ocurre con esas otras, tan maravillosas, obra de los de *sapiens*, decenas de miles de años después; basta con pensar en las cuevas de Altamira o Lascaux que datan de hace unos dieciocho mil años. Representan largas series de animales, algunos hombres y escenas de caza. Con todo, ¿realmente pensamos que valía la pena

penetrar en cuevas oscuras, iluminarlas a la débil luz de las antorchas o de fuegos encendidos a propósito, buscar los colores y mezclarlos con pericia para ejercitarse luego durante años para pintar escenas de la vida cotidiana?

Detrás de cada mano que pinta en cualquiera de esas cuevas hay una escuela, hecha de enorme disciplina y durísimas selecciones. Solo los más dotados podían disfrutar del privilegio de quedar exentos, al menos en parte, del arduo trabajo que exigía la supervivencia para ser empleados en estas actividades. Debemos imaginarnos entre los *sapiens*, y antes incluso entre los neandertales, a grandes maestros o maestras que transmiten las técnicas, escogiendo a los más prometedores de sus discípulos, aquellos a quienes se les otorgará el testigo de tan preciosos conocimientos técnicos. Afirmar que esas pinturas servían para explicar a los jóvenes las técnicas de caza sería como creer que el índice del Dios creador que roza el de Adán en la Capilla Sixtina es un típico saludo judío. Detrás del detalle de esos frescos hay un universo simbólico, arquitrabe de una sociedad entera que quiere celebrarse y transmitirse.

Nunca descubriremos el significado que los neandertales atribuían a sus representaciones, pero sabemos que esas obras, a sus ojos, tenían un valor inmenso; los ritos y las ceremonias que tuvieron lugar en esas cuevas estaban considerados de importancia vital para mantener unidas esa sociedad. El prejuicio de que los *sapiens* suplantaron a los neandertales porque tenían un lenguaje más rico, una estructura social más articulada, un universo simbólico más desarrollado ha resultado completamente erróneo.

La aparición del pensamiento simbólico marca una de las etapas fundamentales de la evolución humana. Hoy sabemos que las habilidades cognitivas más sofisticadas que este desarrollo conlleva no son una prerrogativa de los *sapiens*, sino que tienen orígenes mucho más antiguos y que también las compartieron los neandertales. Acaso, para establecer su génesis, sea necesario retroceder aún más atrás en el tiempo, concentrando las investigaciones en los primeros neandertales, o remontarse incluso hasta el antepasado común del que se originaron las dos especies.

Lo cierto es que la construcción del gran relato de los orígenes, tan estrechamente relacionado con el proceso que nos volvió humanos, hunde sus raíces en la noche de los tiempos.

EN EL PRINCIPIO HUBO EL THAUMA

En su obra *Teeteto*, Platón hace decir a Sócrates: «Experimentar eso que llamamos la admiración es muy característico del filósofo. Este y no otro, efectivamente, es el origen de la filosofía». También Aristóteles, en el celeberrimo pasaje que abre el primer libro de la *Metafísica*, escribe: «Lo que en un principio movió a los hombres a hacer las primeras indagaciones filosóficas fue, como lo es hoy, la admiración». Ambos emplean el término *thaumazein*, que contiene la raíz *thauma*, la misma que aparece en «taumaturgo», y se traduce a menudo como «asombro». Así pues, la filosofía nace del estupor, mezclado con curiosidad, frente a algo inexplicable, que nos fascina y nos domina. Aristóteles escribe explícitamente que los hombres, partiendo de las preguntas más simples, llegaron a preguntarse sobre fenómenos cada vez más complejos, llegando a plantearse cuestiones acerca de la Luna, el Sol y los demás astros, y a preguntarse de dónde se había generado todo el universo.

La sensación de asombro frente a un cielo estrellado supone, todavía hoy, una emoción intensa, en la que se escucha el eco del antiguo estupor que marcó a las miles de generaciones que nos han precedido. Pero tal vez este sentimiento no sea suficiente para entender de dónde viene esta urgencia profunda, primordial, casi innata de buscar respuesta a las grandes preguntas.

El tema ha sido abordado por Emanuele Severino, quien insistía mucho en la necesidad de traducir *thauma* con «maravilla mezclada con angustia». De esta manera pretende recuperar el significado original de la palabra, según el cual el conocimiento actúa como «antídoto ante el terror causado por el acontecimiento de aniquilación que sale de la nada».

El término, en efecto, ya aparece en Homero, quien habla de *thauma* cuando describe a Polifemo, el monstruo monóculo que despedaza y devora a los desafortunados compañeros de Ulises. En este caso, el vínculo con la angustia, inherente a la palabra, resulta más evidente. La visión del mítico cíclope, un monstruo de cuerpo colosal, provoca al mismo tiempo estupor y terror. El gigante, símbolo de la fuerza salvaje de la naturaleza, suscita asombro por su asombroso poder y al mismo tiempo angustia por la noción de irrelevancia y caducidad que nos transmite. Las fuerzas desatadas de la naturaleza, un volcán en erupción, un terrible huracán, nos fascinan y nos asustan porque pueden despedazarnos y engullirnos en un instante. En esta grandiosa representación, el papel que desempeñamos nosotros, pequeños seres frágiles, constantemente expuestos al sufrimiento y la muerte, resulta completamente irrelevante.

De ahí que el relato, la explicación, ya sea mítica o religiosa, filosófica o científica, mientras nos ofrece una explicación de lo maravilloso, en ese preciso momento nos consuela y nos tranquiliza; pone orden en la secuencia incontrolable de los acontecimientos y al hacerlo nos protege de la angustia y del terror. Este relato, en el que todos tienen un papel y cada uno representa

su parte, asigna un significado al grandioso ciclo de la existencia. Nos tranquilizamos porque nos sentimos protegidos y se atenúa nuestro miedo a morir. Sin dejar de ser conscientes de que todo acabará para nosotros, y muy pronto respecto a los grandes ciclos temporales de evolución de las estructuras materiales que nos rodean, saber que el conjunto obedece al orden del relato nos tranquiliza.

Durante millones de años, la humanidad ha tenido que lidiar cotidianamente con la dureza de la existencia. Desde hace algunas décadas, y solo para una parte de la población mundial, esta experiencia de extrema fragilidad y precariedad total se ha atenuado. Pero en lo profundo de nuestros corazones todavía sentimos esa angustia ancestral. Todos somos como Leo, el niño protagonista de *Melancolía*, quien, frente la catástrofe ineluctable que se dispone a arrasarse la Tierra busca protección y consuelo. Le hace falta alguien que le diga: no tengas miedo, no te pasará nada. Encontrará ese alguien en su tía Justine, una persona que sufre, que en la vida ordinaria vivía aniquilada por una fuerte depresión, pero que en el momento del peligro, mientras las personas sanas y normales pierden la cabeza, sabrá comportarse de la manera más lúcida y sacará fuerzas para mantener su humanidad. La pequeña tienda en la que se refugia con el niño no los protege de la catástrofe, pero hasta un momento antes de la colisión, refugiado en los brazos acogedores de su tía, escuchando su sosegado relato, el niño se sentirá a salvo.

Arte, belleza, filosofía, religión, ciencia, en una palabra, la cultura, son nuestra tienda mágica, y la necesitamos, desesperadamente, desde tiempos inmemoriales. Con toda probabilidad nacieron juntos, son formas diferentes en las que se articula el pensamiento simbólico. No resulta difícil imaginar que los ritmos y las asonancias de las palabras facilitaron la transmisión mnemónica del relato de los orígenes y que, con este, nacieron también el canto y la poesía; que sucedió lo mismo con los signos y símbolos representados en los muros, con una perfección formal cada vez más refinada o que en los rituales y ceremonias que acompañaban los momentos de celebración o de duelo, ciertos sonidos regulares podían acompañar los movimientos rítmicos del cuerpo o el canto del sabio o del chamán. La ciencia es parte de ese relato, no es casualidad que sea al mismo tiempo *episteme* y *techne*, conocimiento y capacidad para producir utensilios, objetos, máquinas.

Tampoco es casual que para los griegos *techne*, raíz de la técnica, indique asimismo una actividad artesanal y artística al mismo tiempo y, de este modo, al tallar sílex bifaciales, a las exigencias técnicas de una herramienta afilada y manejable se sumen las estéticas, de manera que el resultado sea una pieza simétrica, fina, perfectamente equilibrada, hermosa, por decirlo con una palabra, como un objeto artístico.

Estas exigencias parecen ser algo ineludible para todos los grupos humanos que han pisado la Tierra desde hace milenios. Hasta las tribus aisladas más remotas, descubiertas de vez en cuando en un bosque de Borneo o en la Amazonia, han desarrollado sus propios rituales, formas peculiares de expresión artística y su propio universo simbólico, todo él construido en torno a un gran relato de los orígenes. Sin este, no solo no pueden erigirse las grandes civilizaciones, sino que ni siquiera las estructuras sociales más elementales consiguen sobrevivir. La razón por la cual todos los grupos humanos de nuestro planeta se caracterizan por fuertes atributos culturales estriba por entero en esto.

## LA POTENCIA DE LA IMAGINACIÓN

La cultura, la conciencia de uno mismo y de las propias raíces más profundas es una especie de superpoder que garantiza mayores posibilidades de supervivencia incluso en las condiciones más extremas. Imaginemos por un momento que dos grupos sociales primitivos, pequeños clanes neandertales, viven aislados el uno del otro en la gélida Europa de aquella época; y supongamos que, por casualidad, uno de los dos grupos tiene su propia visión del mundo, cultivada y transmitida mediante rituales y ceremonias durante generaciones y acaso representada en las cuevas en las que vivía el grupo, y el otro, en cambio, no; es decir, que ha evolucionado sin desarrollar ninguna forma refinada de cultura. Ahora supongamos que una terrible tragedia afecta a ambos grupos: una inundación o un período de intenso frío, o tal vez un ataque de animales feroces que extermina a todos los miembros de ambos clanes excepto a uno. El único superviviente, para cada uno de los dos grupos, tendrá que superar mil peligros, enfrentarse a toda clase de privaciones, desplazarse a otras zonas y sobrevivir tal vez a los ataques de grupos humanos hostiles. ¿Cuál de los dos mostrará más resiliencia? ¿Quién tendrá más posibilidades de sobrevivir?

El gran relato de los orígenes te da la fuerza para levantarte de nuevo cuando estás en la lona, proporciona razones para soportar la desesperación más sombría. Aferrarse a la manta que protege y da identidad, permite encontrar la fuerza para resistir. Situarse a uno mismo y al propio clan en una larga cadena de acontecimientos, que hunde sus raíces en un pasado lejano, nos permite imaginar un futuro. Quien tiene esta conciencia puede enmarcar

en un contexto más amplio los terribles sacrificios del presente y, al dar sentido al sufrimiento, es capaz de superar mejor las tragedias más terribles.

Esa es la razón por la que aún seguimos aquí, a miles de generaciones de distancia, dando valor al arte, a la filosofía, a la ciencia. Porque somos los herederos de esta selección natural. Los individuos y los grupos más capaces de desarrollar un universo simbólico han gozado de una gran ventaja evolutiva, y nosotros somos sus descendientes.

La potencia de lo simbólico y la fuerza de la imaginación no deben sorprendernos. Nuestra condición de animales sociales es algo más profundo y constitutivo que el mero hecho de vivir en grupos organizados de individuos.

En los últimos años se han puesto en marcha a escala mundial proyectos científicos muy ambiciosos que estudian el funcionamiento del cerebro humano. Se trata de iniciativas multidisciplinares, financiadas por abundantes recursos, en las que trabajan miles de científicos. En muchos casos, para comprender en detalle algunos de los mecanismos básicos, se están produciendo redes de simuladores electrónicos de neuronas y sus interacciones. Todo ello resulta muy útil para comprender algunas dinámicas operativas, pero ¿por qué son los propios neurocientíficos quienes nos dicen que no tendría sentido, por el contrario, expandir estas estructuras elementales para tratar de crear un cerebro artificial?

No se trata únicamente de superar grandes dificultades técnicas; nuestra caja craneal alberga casi noventa mil millones de neuronas capaces, cada una, de establecer hasta diez mil sinapsis con sus vecinas. La cuestión es más de fondo. Aunque se pudiera construir un aparato electrónico tan complejo que reprodujera exactamente la estructura de nuestro cerebro, eso no sería un cerebro humano. Le faltaría aún un ingrediente esencial, mucho más complicado de reproducir en forma electrónica. La interacción con otros cerebros humanos, mediada por el lenguaje, el cuerpo y las relaciones emocionales. En otras palabras, nos volvemos humanos en los ojos de los demás, a través de la mirada y el intercambio de emociones, interactuando con otros seres humanos que se relacionan con nosotros en el grupo social.

El cerebro plástico del recién nacido va adquiriendo forma en la relación con el mundo mediada por los adultos que lo toman bajo sus cuidados, empezando por la mirada de la madre. El niño, que mira a los ojos de quien lo alimentan, modifica sus sinapsis sobre la base de las reacciones que se producen en esa relación. Eso que llamamos *cerebro humano* nace de la interacción entre ese sistema plástico, capaz de adaptarse y ajustarse a los estímulos provenientes del exterior, y un conjunto de relaciones que se establecen con el resto del grupo social. Es una relación que se alimenta de deseos y esperanzas y comienza antes incluso de que el embrión se implante en el cuerpo de la madre. Dialoga con los sueños de los padres, que anteceden

al nacimiento, y se confronta con el pasado y los humanos que los han precedido. Se proyecta hacia el futuro a través de las ilusiones que en torno a la figura del recién llegado construye el pequeño grupo social: los abuelos o los padres y sus seres queridos identifican parecidos y reviven historias antiguas, en las que vuelven a aflorar viejos temores y nuevas expectativas. Ningún aparato electrónico podrá reproducir todo esto.

No hay mejor prueba de todo ello que las experiencias de niños abandonados, recién nacidos, en lugares salvajes y criados por una manada de animales. Tienen un cerebro estructuralmente idéntico al de sus coetáneos, que, sin embargo, no ha podido llegar a ser plenamente humano debido a la carencia de la relación. Ningún tratamiento posterior puede llenar completamente el agujero producido en su formación.

Cuando la imaginación y el relato se cultivan dentro del grupo, se convierten en poderosas herramientas de supervivencia. Quienes escuchan e imaginan viven las experiencias de los demás acumulando conocimiento. El relato condensa las lecciones recopiladas por una larga secuencia de generaciones que nos han precedido, consintiéndonos el comprender y ganar experiencia, permitiéndonos vivir mil vidas. Con la imaginación se experimentan emociones y miedos, sufrimientos y peligros y los valores del grupo, las reglas que lo preservan y gobiernan su desarrollo vienen reiteradas y memorizadas en el curso de las generaciones.

La imaginación, desarrollada y alentada en los grupos sociales culturalmente más avanzados, es el arma más poderosa que la humanidad ha sido capaz de desarrollar. De la imaginación nació también la ciencia, que, habiendo elegido basar sus propios relatos en la verificación experimental, tuvo que desarrollar técnicas y visiones cada vez más atrevidas. Para explorar los rincones más recónditos de la materia y el universo, la ciencia ha tenido que superar todos los límites y ha hecho del relato de los orígenes un viaje extraordinario.

Al hacer esto, se ha visto obligada a menudo a cambiar los paradigmas de la forma de pensar de la humanidad. Lo ha hecho muchas veces a lo largo de la historia, desde Anaximandro hasta Heisenberg y Einstein, y aún lo sigue haciendo. La ciencia avanza sin cesar y cambia la forma de ver y de relatar el mundo. Cada vez que esto ocurre todo cambia. No solo a causa de los instrumentos y las tecnologías que van surgiendo, sino sobre todo porque, al cambiar los paradigmas, todas nuestras relaciones se modifican. Cuando se observa el mundo con ojos distintos, cambia nuestra cultura, arte y filosofía. Conocer estos cambios y anticiparse a ellos significa tener las herramientas para construir una comunidad de seres humanos mejores.

Por eso siguen siendo hoy el arte, la ciencia y la filosofía disciplinas fundamentales, porque dan consistencia a nuestra condición de seres humanos. Esta visión unitaria del mundo, que nace en nuestro pasado más



remoto, sigue siendo el instrumento más adecuado para afrontar los desafíos del futuro.

## Epílogo

### La masacre de la Asunción

Módica, 21 de febrero de 2018. El Valle de Noto está repleto de joyas, pero cuando se llega a Módica, especialmente al atardecer, el hechizo es absoluto: una ciudad partida en dos por el espolón de la colina del Pizzo, dominada por el Castillo de los Condes; sus casas adosadas unas a otras, cubren las laderas de montaña en las que todavía se abren cuevas antiguas, y las numerosas iglesias barrocas que se yerguen sobre imponentes escalinatas. Módica es una inesperada maravilla.

Estoy aquí para hablar del origen del universo en un simposio dedicado a Tommaso Campailla, filósofo, médico y científico. La ciudad donde nació, en 1668, ha decidido recordarlo en el 350 aniversario de su nacimiento y la iniciativa toma su nombre del título de su obra más importante: *L'Adamo, ovvero il mondo creato* [El Adán, o el mundo creado]. Campailla, fino estudioso de Descartes, que mantuvo correspondencia con los grandes de su tiempo, hasta el punto de que George Berkeley vino a visitarlo a Módica, escribió este poema filosófico en verso como un compendio de la creación. Mañana, inspirados por esto, hablaremos de la Biblia y del Génesis, de la creación y de la ciencia, y además de mí, han invitado a Shalom Bahbout, rabino jefe de Venecia, y al jesuita y teólogo padre Cesare Geroldi.

Cenamos todos juntos, invitados a un excelente restaurante dirigido por una familia de origen judío, y el menú es estrictamente *kosher*. A la mesa se sientan con nosotros representantes de la pequeña comunidad judía local, que están recaudando fondos para reabrir una sinagoga. Alguien en la cena recuerda la masacre de la Asunción, un lejano episodio en la historia de Módica que marcó profundamente la vida de la antigua comunidad.

Estamos en 1474 y en la ciudad vive desde hace siglos una sólida comunidad judía, casi toda en el barrio de Giudecca. Para el sermón del día de la Asunción llega de Ragusa un célebre fraile dominico, Giovanni da Pistoia, orador impetuoso, que celebrará la misa en la iglesia de Santa Maria de Belén. La práctica de los sermones evangelizadores lleva mucho tiempo vigente, y

los judíos están obligados a seguir la función con el propósito de inducirlos a convertirse. Ha sucedido otras muchas veces, y nunca ha habido problemas, pero ese domingo algo se tuerce. Estalla un tumulto entre la muchedumbre, se producen incidentes muy graves, hay muertos. Una multitud armada con picas, cuchillos y herramientas de trabajo ataca a los judíos presentes y cubre de sangre la anteiglesia. Entre gritos de «¡Viva María! ¡Muerte a los judíos!», se degüella a hombres, mujeres y niños; luego la multitud se dirige hacia Giudecca para asaltar las casas. Los muertos se cuentan por centenares, todas las viviendas son saqueadas y la sinagoga es pasto de las llamas; la caza al judío dura días. Los pocos supervivientes del terrible pogromo se esconden en las cuevas o huyen a otras ciudades en busca de protección. Desde entonces no hay ya en Módice un lugar de culto para los judíos, y los descendientes de esa pequeña comunidad, que han pasado por un sinfín de adversidades, incluidas las leyes raciales y las deportaciones, quieren reconstruir su sinagoga.

Al día siguiente, en el simposio, soy el primero en hablar y cuento el nacimiento del universo tal como lo describe la ciencia. Después toma la palabra el padre Cesare Geroldi, un jesuita y teólogo de Crema que vivió muchos años en Jerusalén y ha editado una nueva traducción del libro del Génesis. El padre Geroldi tiene un físico imponente, es un gran narrador, fascinante y carismático.

El comienzo de su intervención es fulminante: «El profesor Tonelli les ha contado el nacimiento del universo. Lo que les ha dicho es la descripción más precisa de lo que sucedió hace 13 800 millones de años, un pasado lejano. Yo voy a hablarles en cambio del Génesis. Un libro que habla sobre el futuro». Y cuenta que, para entender el libro del Génesis, debemos partir de la época y el contexto en el que fue escrito.

Los libros, ahora ya quedan pocas dudas, son dos en realidad, escritos en diferentes épocas y por distinta mano e integrados en el primer libro de la Torá. El biblista cita las numerosas contradicciones de las dos versiones; enfatiza las variaciones de lenguaje y estilo y las dos diferentes narraciones de los mismos acontecimientos, en las cuales no solo es diferente la secuencia de los hechos —plantas y animales creados antes o después del hombre— sino que incluso cambia el apelativo del personaje principal: el Elohim del primer Génesis se convierte en el impronunciable Yhwh del segundo.

Pero lo más importante viene después, cuando explica el contexto en el que se escribió el más sagrado de los libros. Estamos en Babilonia, en el siglo VI a. C. Nabucodonosor II, después de haber conquistado Jerusalén y destruido el Templo, ha deportado a la élite religiosa, social e intelectual del pueblo judío. Es la más terrible de las desgracias, y para la antigua religión de Abraham y Moisés parece haber llegado la última hora. Los más orgullosos de los miembros del pueblo elegido, que han sido humillados y arrancados de

sus tierras, se enfrentan ahora con el desmesurado poder de quien los ha derrotado, que no es solo material y militar. Nabucodonosor, rey del universo, representa una civilización que no tiene igual en la época. Babilonia es la ciudad más grande del mundo y sus maravillas resplandecen; sus estudiosos sobresalen en todas las disciplinas y han reunido en miles de tabletas y papiros el conocimiento transmitido durante milenios.

Al verse confrontados con la civilización de la palabra escrita, que los asirio-babilonios habían desarrollado, los sabios judíos deciden recopilar también, por primera vez en un texto escrito, el relato de los orígenes del pueblo judío. En el momento de la desesperación más terrible, se aferran al texto que encierra su identidad, sus raíces más profundas. A ese libro sagrado confían la esperanza de superar la cadena de desgracias que se ha abatido sobre ellos: mediante el relato del origen del mundo buscan su futuro, sueñan con regresar a Jerusalén y reconstruir el Templo y su gloriosa civilización.

Será la misma reacción que, durante milenios, cultivarán generaciones de familias judías forzadas a las pruebas más duras. Aferrándose a la Biblia, podrán superar las persecuciones más terribles. Ese mismo será también lo que hagan los pequeños grupos de judíos que sobrevivieron en Módicta a la masacre de la Asunción.

De estas sugerencias nace la idea de escribir este libro. Para permitir que todos puedan apropiarse del gran relato de los orígenes que la ciencia moderna nos entrega, comprender nuestras raíces más profundas y encontrar estímulos con los que afrontar el futuro.

## Agradecimientos

Quiero dar las gracias a todas las personas que, a través de conversaciones y discusiones, me proporcionaron inspiración para este libro: Sergio Marchionne, el padre Cesare Geroldi, el rabino Shalom Bahbout, Remo Bodei, monseñor Gianantonio Borgonovo, Vito Mancuso, Pippo Lo Manto, Piero Boitani, Sonia Bergamasco y Lucia Tongiorgi.

Un agradecimiento especial a Alessia Dimitri, sin cuya determinación esta nueva aventura no habría comenzado siquiera.

Por último, un agradecimiento particular a Luciana no solo por la paciencia con la que ha soportado el período de exceso de trabajo que ha implicado la redacción de este libro, sino también por sus infinitas sugerencias, las numerosas discusiones sobre el arte y la filosofía, y la cuidadosa lectura del manuscrito que han permitido profundizar y mejorar muchas partes del texto.



Guido Tonelli (1950) es un físico de partículas italiano que participó en el descubrimiento del bosón de Higgs en el Gran Colisionador de Hadrones. Es profesor de Física General en la Universidad de Pisa (Italia) y científico visitante del CERN.