

Edoardo Boncinelli y Antonio Éreditato

El cosmos de la mente

Breve historia de cómo
el hombre ha creado el universo



Edoardo Boncinelli y Antonio Ereditato

EL COSMOS DE LA MENTE

Breve historia de cómo el hombre
ha creado el universo

Traducción de Juan Manuel Salmerón Arjona

TUSQUETS
EDITORES

Título original: *Il cosmo della mente. Breve storia di come l'uomo ha creato l'universo*

1.^a edición: marzo de 2020

© Edoardo Boncinelli, 2018

© Il Saggiatore S.r.L., Milano, 2018

Publicado por acuerdo especial con The Ella Sher Literary Agency

© de la traducción: Juan Manuel Salmerón Arjona, 2020

Reservados todos los derechos de esta edición para

Tusquets Editores, S.A. – Avda. Diagonal, 662-664 – 08034 Barcelona

www.tusquetseditores.com

ISBN: 978-84-9066-799-6

Depósito legal: B. 2.920-2020

Fotocomposición: Realización Tusquets Editores

Impresión: Black Print

Impreso en España

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

Queda rigurosamente prohibida cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación total o parcial de esta obra sin el permiso escrito de los titulares de los derechos de explotación.

Índice

Agradecimientos	11
Prólogo	13
1. Observar el mundo.	17
2. Nosotros y el microcosmos	45
3. <i>Fiat lux</i>	69
4. Átomos ligeros y átomos pesados	85
5. Al fin, la vida.	99
6. Un ser medianamente inteligente, pero muy ingenioso.	115
7. La vida extraterrestre	135
8. Nuestra CPU sabe lo que es.	149
9. El oficio más bello del mundo	161
10. Rebobinemos	179

Observar el mundo

El hombre ha alzado siempre los ojos al cielo de noche, porque durante el día es la Tierra la que llama nuestra atención, por mil razones, objetivos, peligros, proyectos. Y siempre hemos sabido que en el cielo está el Sol: es un hecho. Es un Sol dominante, que hace que el cielo diurno sea monótono y demasiado luminoso para que lo admiremos. Hoy sabemos que es una estrella, nuestra estrella, sin la cual no podríamos hacer nada, ni siquiera nacer. Es, pues, sobre todo de noche cuando el cielo nos impresiona. Kant decía: «Dos cosas me admiran sobre todo: el cielo estrellado sobre mí y la ley moral dentro de mí». Que dentro de todos nosotros haya una ley moral no está tan claro, pero no cabe duda de que sobre la cabeza tenemos el cielo estrellado, que solo vemos de noche. No sabemos, claro está, qué impresión causaba esto a nuestros antepasados, que pensaban que habitaban un planeta, como lo llamamos hoy nosotros, que entonces era simplemente la Tierra, la casa del hombre, plana o redonda según las épocas y las opiniones.

Antiguamente se pensaba que nuestro mundo estaba rodeado de una serie de esferas semitransparentes concéntricas que constituían la bóveda celeste, accesoria y dependiente del centro de todo, la Tierra. Sin embargo, no hay duda de que, en una noche límpida —y desde luego en aquellos tiempos las noches eran más límpidas que hoy—, el cielo ofrecía

un espectáculo increíble. En la oscuridad del firmamento se ve un número inmenso de puntitos luminosos, y cualquiera que haya tenido esta experiencia, aunque sea hoy día, en una zona no contaminada por la luz artificial sabrá que el número de estrellas es realmente impresionante, tanto que deja sin respiración. Isaac Asimov contó poéticamente esta sensación en una novela titulada *Anochecer*. Nada menos que seis soles, escribe Asimov, iluminaban en todo momento un planeta lejano, por lo que no existía la noche ni la oscuridad, que todos los habitantes temían desde tiempos ancestrales. Su religión hablaba de un lejano pasado en el que, por una extraña combinación de los movimientos astrales —sin duda el raro eclipse de una de sus lunas—, la luz desapareció y todos los habitantes enloquecieron, incapaces de adaptarse a las tinieblas persistentes. Según los cálculos de los científicos, el fenómeno iba a repetirse y el terror empezó a cundir entre la gente a medida que se acercaba el día previsto. Ese día llegó la oscuridad, inexorable, y rápidamente triunfó sobre la luz. Pero entonces ocurrió algo inesperado y quizá aún más terrible: en el cielo finalmente negro aparecieron infinidad de lucécitas que llenaron el inmenso escenario. Aquel espectáculo sobrecogedor era la verdadera causa de la locura...

A lo largo de los siglos, el hombre incluso ha ordenado, de manera totalmente arbitraria, algunos de esos muchos puntos luminosos en las llamadas constelaciones. Todos conocemos la Osa Mayor, seguramente también la Osa Menor, que incluye entre otras la estrella Polar. Y vemos fácilmente Casiopea, una gigantesca W, y muchas otras combinaciones-constelaciones. Pues bien: hay que saber que las constelaciones no existen en realidad, no son más que una construcción mental nuestra. Viendo que una serie de estrellas formaban una figura, se creyó que pertenecían físicamente a un grupo específico, la constelación, a la que a continuación

se atribuyeron, de manera no menos injustificada, efectos e influencia en la vida de los hombres. Hoy sabemos que las estrellas de una misma constelación no tienen ninguna relación entre sí. Una puede estar relativamente cerca de nosotros, otra lejísimos; una puede ser muy luminosa, otra menos. Conviene que nos paremos a reflexionar un momento sobre este hecho: porque nada fue siempre tan evidente como las constelaciones, ni nada más falso también. Hoy sabemos que las constelaciones son pura apariencia, una construcción artificial, pero que tuvo una importancia fundamental para el hombre antiguo; las figuras que componen parecen estar fijadas en la bóveda celeste y un ojo acostumbrado y lleno de imaginación como era el de nuestros antepasados las usaba para orientarse en el cielo, mucho antes de que descubriéramos la brújula y no digamos los radares electromagnéticos y los complejos instrumentos de los que hoy disponemos. Las constelaciones eran una indicación de la dirección que había o no había que tomar, mucho más que figuras de horóscopo.

A este espectáculo del cielo estrellado se suma otro. Si nos fijamos, vemos que encima de la W de Casiopea hay una especie de río luminoso, tan cuajado de estrellas que no podemos ni contarlas ni distinguirlas unas de otras; los antiguos bautizaron ese río Vía Láctea; nosotros, en términos modernos, lo llamamos Galaxia. En realidad, es la visión «de canto» de nuestra galaxia, que nos muestra la proyección geométrica de gran parte de las estrellas que la constituyen. La Vía Láctea es, pues, la primera galaxia que el hombre ha visto, en la que se sitúan el Sol, su sistema solar y con él nuestra Tierra en una posición un poquito periférica, lo que nos permite observar la parte central, precisamente esa estela luminosa que llamamos Láctea. Hoy sabemos que en el universo hay muchísimas galaxias, cientos de miles de millones, más o menos como la nuestra y separadas por distancias abismales.

Las mismas galaxias se agrupan formando gigantescos filamentos que constituyen la red del cosmos y delimitan inmensas zonas vacías, en las que no hay galaxias ni, por tanto, estrellas. No podemos saber qué impresión causaba a nuestros antepasados este espectáculo, pero sin duda era más o menos el mismo todas las noches, con una configuración del firmamento que gira en torno a la estrella Polar, situada en la cola de la Osa Menor y que llamamos así porque se ve siempre en la dirección del polo Norte terrestre.

Hay que tener en cuenta que las observaciones astronómicas se realizaron durante milenios a simple vista, o sea, sin ayuda de ningún instrumento, igual que hacen todos los demás animales, con sus sentidos diversamente desarrollados. A este respecto hubo un gran debate, sobre todo en el pensamiento griego antiguo antes y después de Sócrates, sobre la potencia de nuestros sentidos, limitados como están por su sensibilidad y poder de resolución. En el caso de la vista, sensibilidad quiere decir capacidad de percibir luces o señales luminosas, aunque sean muy débiles. Por poder de resolución entendemos la habilidad de distinguir puntos luminosos próximos, no ya debidos a una única fuente.

Por tanto, gran parte de las primeras observaciones de la naturaleza, del cielo y de cuanto nos rodea las hicimos con nuestros sentidos biológicos, ayudados por un aparato nervioso y por el sistema central que culmina en el cerebro. El hecho de que los sentidos no sean infinitamente potentes, esto es, que a partir de cierto límite no funcionen con eficacia —porque la luz sea poco intensa, un sonido sea demasiado débil o el tacto no aprecie ciertos pequeños relieves—, lleva consigo el que nuestra capacidad de interpretar y explicar, es decir, de elaborar las señales provenientes de los sentidos, sea también reducida. El ser humano está, pues, limitado por partida doble, aunque objetivamente la madre naturaleza lo

haya equipado muy bien. Sus sentidos perciben innumerables estímulos y el cerebro es capaz de interpretar y a veces explicar un gran número de situaciones, incluso dentro de estrechos límites objetivos. Nuestra posición en el universo y su representación están, por consiguiente, determinados por esos límites.

Ligada a este proceso cognitivo está la capacidad más o menos desarrollada de generar una imagen mental de la realidad. Por ejemplo, cuando nos dicen que una estrella dista de nosotros cien millones de veces más que el Sol, nos cuesta crear una imagen interpretativa de este dato; lo mismo nos ocurre cuando sabemos que el universo tiene 13.800 millones de años de vida, o que existe vida en la Tierra desde hace 4.000 millones de años.

Cuando, en el siglo pasado, pasamos de la observación de lo inmensamente grande a la de lo inmensamente pequeño, a saber, las partículas atómicas y subatómicas, nos dimos cuenta de pronto de hasta qué punto eran limitadas nuestras capacidades de observación, percepción e imaginación. Del mismo modo que nos resulta difícil imaginarnos algo que diste cien millones de veces más que el Sol, los mismos problemas tenemos para comprender que un objeto sea un millón de veces más pequeño que un grano de arena. Pero estas entidades difícilmente representables existen, tanto a escala grande como pequeña. Y aquí se nos plantea una primera pregunta: ¿por qué nosotros, animales, aunque un poco especiales, forjados por la evolución biológica, tenemos capacidades perceptivas limitadas, tanto en las escalas pequeñas como en las grandes? La pregunta tiene notable relevancia, aunque en cierto sentido la respuesta pueda parecer trivial. Nosotros hemos evolucionado, aunque lentamente —4.000 millones de años desde el primer organismo unicelular y apenas unos millones como seres humanos—, adaptándonos al ambiente en

el que vivíamos. Esta última observación no es tan obvia y, antes de seguir, conviene que reflexionemos sobre los números que describen y caracterizan al universo en las dos escalas extremas, la de lo infinitamente pequeño de sus componentes últimos (las partículas elementales) y la inmensa escala cosmológica de la astronomía y la física del espacio.

Para ello tendremos que enfrentarnos a números extremos siempre que salgamos del dominio de nuestra experiencia común y estudiemos el universo en toda su plenitud. Estos valores numéricos exceden con mucho la percepción de nuestro cerebro, que ha evolucionado operando a escalas de distancia y de tiempo «humanas», como metros y kilómetros, minutos y años. Del mismo modo se ha adaptado el ojo a la luz «visible» y no a los rayos ultravioletas, y así también ha parecido conveniente, desde el punto de vista de la selección de la especie, tener una caja torácica que proteja el corazón. Por eso no es casualidad que podamos formarnos fácilmente una imagen mental de «cien metros» o de «dos días», pudiendo asimismo establecer analogías cuantitativas relativamente exactas: comparar dos días con veinte, un centímetro con 1,2 metros. Por lo mismo, nos hacemos una imagen operativa de lo que son cien metros calculando el tiempo que empleamos en recorrer esa distancia, por ejemplo caminando. Lo mismo vale para un kilómetro e incluso para cinco. La cosa cambia cuando hablamos de mil kilómetros. En este caso podemos «calibrarnos» pensando en lo que tardamos yendo en coche o en avión. Y así podemos hacernos una idea razonable de lo que significan 10.000 kilómetros: medio día de vuelo en avión o diez días seguidos de autopista en coche. Pero ¿qué pasa si hablamos de 384.000 kilómetros, la distancia que separa la Tierra de la Luna? Sí, podríamos tratar de expresar esta enorme distancia diciendo que con un hipotético avión que dispusiera de reservas ilimitadas de carburante y

viajase sin interrupción llegaríamos a la Luna en dos semanas, pero sería poco eficaz. Para distancias mayores, directamente nos perdemos. Por no hablar de cuando nos vemos obligados a «cambiar de escala» y pasar de los kilómetros a los años luz. Un año luz es la distancia que recorren las ondas electromagnéticas (y por tanto también la luz) en un año, «astronómicamente» inmensa, de unos 9,5 billones de kilómetros, esto es, 9.500.000.000.000 kilómetros. Es algo totalmente incomprensible para nuestro pequeño cerebro humano, calibrado, como decimos, según los tiempos y las longitudes propios de nuestro hábitat terrestre. Solo para que nos hagamos una idea, si la Tierra tuviera las dimensiones de la sección de un cabello, el Sol sería como una bola de flipper situada a un metro de distancia, y la segunda estrella más cercana, Próxima Centauri, sería otra bola más o menos igual que estaría a 260 kilómetros de nosotros. Por cierto, para llegar a Próxima Centauri, que dista cuatro años luz de la Tierra —la Luna dista un segundo luz y el Sol ocho minutos luz—, tardaríamos 70.000 años con las naves espaciales actuales. Para que el lector no se deprima, debe saber que el método en el que está trabajándose actualmente es el de enviar a las estrellas vecinas un gran número de microsondas espaciales impulsadas por potentísimos rayos láser; esta ciencia ficción tecnológica podría transportar las sondas a velocidades de entre el 10 y el 20 por ciento de la velocidad de la luz, con lo que la duración del viaje se reduciría drásticamente a decenas de años. No perdamos la fe, pues...

El mismo problema tenemos cuando tratamos de imaginar distancias infinitesimales. No le demos vueltas: más allá de lo que podemos observar con nuestro instrumento principal de medir distancias, el ojo, auxiliado si acaso por lentes o microscopios, hablar de dimensiones atómicas o subnucleares no tiene ningún sentido «común». Argumentos análogos

se aplican cuando consideramos tiempos microscópicos o macroscópicos. Un segundo se asocia al latido de nuestro corazón; una centésima de segundo a la distancia que separa a dos velocistas en la meta de los cien metros lisos. Pero ya la décima de milisegundo plantea serios problemas de comprensión. Es verdad que con nuestros modernos instrumentos electrónicos podemos realizar experimentos incluso de nanosegundos (un nanosegundo es la milmillonésima parte de un segundo) o de picosegundos (un picosegundo es la billonésima parte de un segundo), pero está claro que esto queda fuera de nuestros sentidos biológicos. Pensemos luego en las «eras» de las que hablan los científicos para referirse a la vida de nuestro universo, que van de 10^{-30} a 10^{-20} segundos después del Big Bang: son un intervalo de tiempo totalmente insignificante y que se nos antoja puramente académico. Pero no lo es. Como veremos, durante esas eras ocurrieron cosas fundamentales para la vida del universo, sin duda más relevantes que todo lo que ha ocurrido en los últimos mil millones de años. A propósito de números grandes y pequeños, recordemos cómo funciona la notación exponencial. Por ejemplo, 10^6 significa un 1 seguido de 6 ceros (1.000.000, o sea, un millón); análogamente, 10^{-8} significa 0 coma 7 ceros y un 1, es decir, 0,00000001. Esta convención matemática resulta especialmente útil cuando hablamos de tamaños muy distintos de los de nuestro mundo cotidiano.

¿Y qué decir de los tiempos larguísimos? Una vez más, nuestra percepción biológica se queda en las decenas de años. Ya un intervalo de mil años nos resulta completamente inimaginable. ¿Y el tiempo de las eras geológicas? ¿O cuando decimos que el universo tiene 13.800 millones ($13,8 \cdot 10^9$) años? Por lo que a nosotros respecta, tanto vale decir que ha existido siempre.

De esta digresión concluimos que, mientras que nuestro

hábitat es el mundo del centímetro y del minuto, el mundo microscópico de las partículas subatómicas está intrínsecamente unido a tiempos igualmente infinitesimales, y en el mundo cosmológico de estrellas y galaxias, los acontecimientos se producen en intervalos de tiempo de millones y aun de miles de millones de años; por eso no debemos cometer el error de creer que existen escalas de tiempo y longitud privilegiadas por lo que respecta a las leyes que rigen el universo en su totalidad. Sería totalmente erróneo y podría llevarnos a conclusiones falsas y a limitaciones objetivas en nuestro empeño por comprender las leyes de la naturaleza. Dicho sea entre paréntesis, con un poco de pesimismo «cósmico», pero con mucho realismo, debemos admitir que nosotros, nuestro bonito planeta y todo lo que en él ha ocurrido y ocurrirá es completamente desdeñable desde el punto de vista de las dimensiones espaciotemporales de nuestro universo y de su historia. Lo que no quita valor al hecho, objetivamente relevante, de que desde hace unos cientos de años nos preguntemos, a veces con éxito, cómo han nacido, crecido, cómo se comportan y posiblemente se comportarán en los próximos miles de millones de años todas las cosas enormes y fantásticas que nos rodean; capacidad de reflexión que, en buena lógica, se ha desarrollado o se desarrollará en varios miles de millones de otros planetas del universo por parte de otras tantas especies vivas inteligentes.

Nuestro mundo, pues, el que nos es natural, en el que llevamos viviendo millones de años, es el hábitat para el que estamos (mejor) preparados. De esta aparente limitación, ¿tenemos que lamentarnos o, por absurdo que parezca, alegrarnos? Las dos cosas. Por una parte, vemos, sentimos e imaginamos cosas de dimensiones muy distintas, pero, por otra, no podemos pedirles demasiado ni a nuestros sentidos ni a nuestro cerebro, porque no estamos hechos para eso. Algunas de

las cosas de las que hablaremos en este libro tienen dimensiones que estamos acostumbrados a dominar; otras tienen magnitudes muy diferentes.

Empezamos, pues, con el cielo porque es lo más fácil de observar; mirar a lo alto es una acción naturalísima para los hombres y seguramente también para nuestros primos hermanos, los monos; en cambio, veremos que mirar dentro de los átomos y observar el mundo de lo inmensamente pequeño es mucho más difícil y menos natural, aunque, por una serie de motivos, no podamos ni queramos dejar de hacerlo. ¿Por qué? ¿No podíamos conformarnos con percibir y observar las cosas propias de nuestro mundo? Desde luego que sí, pero, históricamente, no ha sido así. Empezamos pronto a preguntarnos por aquello que es demasiado grande para nuestra percepción natural, continuamos ocupándonos de lo que, por el contrario, es demasiado pequeño, y ahora nos interesamos por cosas que son aún más grandes y aún más pequeñas, y se extienden por espacios y tiempos muchísimo más largos y más breves. La razón hay que buscarla en nuestra curiosidad innata de animales inteligentes que quieren aprehender cuanto los rodea: en primer lugar, para percibirlo; en segundo lugar, para describirlo, y, en tercer lugar, si es posible, para comprenderlo. Alguien añadiría un cuarto punto, que es para «cambiarlo».

En efecto, el hombre nunca se ha limitado a observar y acaso comprender las cosas del mundo, sino que ha intervenido resueltamente en ellas, modificándolas poco o mucho para, sobre todo, facilitar, o lo que él creía que era facilitar, su vida en el planeta. Quizá algún día los intentos de modificar el ambiente se extiendan al sistema solar y aun a toda la galaxia. Algunos ven con buenos ojos el progreso del conocimiento, otros solo lo juzgan positivo mientras no sobrepase cierto límite, y otros, por último, echan de menos los

tiempos en los que veíamos poco y sabíamos menos. Pero lo que parece evidente es que no podemos renunciar a este proceso cognoscitivo e interpretativo desde hace al menos dos siglos, cuando, por ejemplo, el uso generalizado del microscopio nos permitió ver las células, los microbios y hasta los virus, y con el catalejo y el telescopio pudimos observar y, por lo tanto, intentar comprender cosas mucho más grandes que las que por naturaleza nos correspondían. La ciencia —o más propiamente la protociencia hasta Galileo— que ha acompañado a nuestra civilización en todo su camino la han producido la voluntad y la capacidad de usar nuestros sentidos para, coordinados por el cerebro, percibir y comprender el mayor número de cosas posible. Para muchas de estas cosas, el hombre ha tenido que ayudarse de dispositivos cada vez más complejos y eficaces que llamamos aparatos o instrumentos.

La ciencia consiste justamente en observar e interpretar de la manera más detallada posible aquello que sucede en nuestro entorno mediante esquemas lógico-matemáticos. Con los instrumentos que completan y extienden nuestros sentidos, hemos llegado a comprender un gran número de fenómenos naturales. Hoy podemos observar cosas cuyas dimensiones no solo exceden nuestras capacidades naturales, sino ante las cuales el concepto mismo de «ver» carece de sentido. Basta pensar en el descubrimiento de las ondas gravitatorias, perturbaciones de la trama espaciotemporal debidas a cataclismos cósmicos en los que intervinieron enormes cantidades de materia y energía. La existencia de estas ondas, previstas a principios del siglo xx, no se demostró experimentalmente hasta cien años después. También las ondas gravitatorias, por extraño que pueda parecer, se utilizan y se utilizarán a su vez como instrumentos completamente nuevos y potentísimos, con objetivos que serían inimaginables

incluso para un hombre de hace treinta o cuarenta años, no digamos para un animal, por muy evolucionado que esté.

En tiempos recientes, hemos usado los instrumentos para potenciar nuestra capacidad de analizar los datos que provienen de la observación. En algunos campos, especialmente en el de la astronomía, recogemos tal cantidad de información que se necesita más tiempo para analizarla y asimilarla del que lleva obtenerla. Hoy se habla mucho de la inteligencia artificial y el *machine learning* como medios auxiliares de procesar grandes cantidades de información, pero esto crea un profundo malentendido. Inteligencia artificial es la traducción literal del inglés *artificial intelligence*; pero *intelligence*, en inglés, no quiere decir «inteligencia», sino «capacidad de comprender». Mientras que para nosotros, los italianos, por razones culturales, la inteligencia es una virtud muy sobresaliente y superior, para los anglosajones es una dote como otra cualquiera. Existe un Intelligence Service y una Central Intelligence Agency, que desde luego no siempre son inteligentes. Inteligente, como nosotros lo entendemos, se dice *smart*. Por tanto, la *artificial intelligence* es esencialmente la capacidad de comprender servoasistida. Lo decimos porque no hay que esperar cosas muy buenas de estos inventos, aunque tampoco cosas muy malas. Seguramente habrá pronto robots y superordenadores que nos dejarán pasmados, pero eso no significa que tengamos que vérnoslas con conciencias o agresividades alternativas: la *intelligence*, esto es, la capacidad de comprender, y hasta que se demuestre lo contrario, la programamos y la ejecutamos nosotros, los seres humanos, y en cualquier caso la controlamos.

Pero volvamos a nuestro cielo nocturno, objeto de las primeras observaciones «científicas» del hombre. Hablábamos de la bóveda celeste, del hombre que alzaba la cabeza y veía miríadas de estrellas, algunas debilísimas, otras débiles, otras

aún fuertes, y a veces hasta distinguía lo que hoy sabemos que son las galaxias, inmensos cúmulos de estrellas que la fuerza gravitatoria, actuando sobre su masa y su materia oscura, de la que hablaremos luego, mantiene cohesionados. A primera vista, las galaxias no se diferencian en nada de las estrellas, pero basta con apuntar hacia ellas un modesto telescopio para darse cuenta de que, en efecto, están compuestas por una serie de estrellas relativamente cercanas, comparadas con la distancia enorme que separa dos galaxias distintas. Todo esto lo han estudiado y analizado científicamente la astrofísica y la matemática y se han formulado hipótesis interpretativas basadas en las observaciones. Hace unos cien años, conceptos como los de agujero negro, curvatura del espacio-tiempo u ondas gravitatorias parecían puros juegos intelectuales. Hoy ya no son un juego y han entrado en la mente y en el bagaje de los científicos, así como en la cultura del hombre de la calle.

Por ejemplo, los agujeros negros, el estadio final del funcionamiento de algunos tipos de estrellas particularmente masivas, son objetos más bien pequeños que pueblan el cosmos, pero que se caracterizan por una densidad de materia enormemente alta, del orden de miles de millones de kilogramos por centímetro cúbico, capaces, pues, de generar una fuerza gravitatoria tan potente que ni siquiera la luz escapa a su atracción, por lo que se ven del todo negros. Los agujeros negros pueden literalmente tragarse las estrellas y la materia interestelar que haya alrededor y aumentar así su masa de manera desmesurada. En el universo los hay relativamente ligeros pero también masivos en extremo, ¡monstruos cósmicos equivalentes a millones o miles de millones de masas solares! Precisamente el choque apocalíptico de dos agujeros negros, cuya masa era de unas treinta veces nuestro Sol, originó las ondas gravitatorias que se descubrieron en 2016. Por

la enorme cantidad de energía que liberó, equivalente a cincuenta veces la emitida por todas las estrellas del universo observable, la colisión provocó una pequeña oscilación en la estructura del espaciotiempo, que registró el detector LIGO, situado en Estados Unidos y distante de los dos agujeros negros la friolera de mil millones de años luz.

Es sabido que el cielo, es decir, el cosmos, es ilimitado, por usar un término antropomórfico. ¡Nada de una Tierra plana que ocupa el centro del universo! Vivimos en un planeta como tantos otros, que gira en torno a una estrella como muchas otras, que forma parte de una galaxia de tamaño mediano. Ya a simple vista, pero aún mejor valiéndonos de instrumentos, podemos hacernos una idea aproximada de lo grande que es el «cielo», esto es, de lo vasto que es lo que hoy llamamos universo observable. Es enorme. Otra característica fundamental de nuestro universo es que está hecho sobre todo de vacío. Si calculamos la cantidad de materia que observamos a simple vista o incluso con los instrumentos más sofisticados y la comparamos con el espacio que ocupa, vemos que gran parte de ese espacio está en realidad vacío. Pensemos que la actual densidad media del universo es de unos $5 \cdot 10^{-31}$ gramos por centímetro cúbico, un valor insignificante, que equivale a la densidad de materia de un cubo cuyo lado mida la tercera parte de la distancia que hay de la Tierra a la Luna y en el que solo haya ¡una moneda de 20 céntimos de euro!

Junto con la observación de lo que hay arriba, encima de nosotros, los últimos siglos nos han deparado la grandísima sorpresa de que también la materia sobre la que nos sentamos, dormimos, comemos, contra la cual chocamos y que nos sobresalta, como sabemos trágicamente por los terremotos, está hecha de vacío. Vacío aquí y vacío allí, aunque sean dos vacíos muy distintos. Cierto es que, a primera vista, la Tierra nos parece muy sólida y plena, aunque esté inmersa en

el enorme vacío cósmico. Y como ella, tampoco la materia que forma las cosas con las que convivimos a diario nos parece nada vacía. Es cierto que el mar es menos rígido y denso que una roca, y el aire, aun con sus vientos, brisas y tifones, nos parece menos consistente que el agua. Pero, en el fondo, no podemos negar que todo lo que nos rodea, bajo la bóveda del cielo cósmico, parece bien relleno de materia bastante densa. Pues bien: si observamos en detalle los componentes fundamentales de la materia, vemos una realidad totalmente inesperada e interesante.

¿Qué es la materia? Aunque no parezca tan evidente, existen las moléculas. Son átomos que se unen entre sí por un tiempo más o menos largo, de manera que una molécula es algo más que el conjunto de los átomos que la componen por separado. Hay moléculas en las mesas y en las rocas, pero también en los seres vivos. Las moléculas de una mesa son entidades relativamente fijas y estables, que pueden permanecer como son cientos y cientos de años; las que hay en nosotros, en cambio, nunca están quietas: se forman, se deshacen, vuelven a formarse y todas ejecutan acciones, principales o secundarias, o incluso aparentemente inútiles. Es, pues, observando a los seres vivos —un hombre, un gato o una libélula— como quizá mejor nos demos cuenta de que el mundo, el animado en este caso, está hecho de moléculas. Pensemos, por ejemplo, en el agua, esencial para los organismos vivos y cuya molécula se denomina, en el lenguaje de la química, H_2O . Está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Sus propiedades —las típicas del agua— no son previsibles simplemente tomando las de los átomos de oxígeno y de hidrógeno y combinándolas. La molécula de agua es una de las más estables que existen y no es casualidad que los seres vivos necesiten agua para vivir y multiplicarse. Hay, sin embargo, moléculas más inestables, como por ejemplo

las que constituyen el combustible de los seres animados: la comida. La comida que comemos está hecha de moléculas de muchos tipos. Algunas de estas moléculas son disociadas, es decir, separadas unas de otras o incluso descompuestas cuando pasan por el tubo digestivo. Antes de que la comida se expulse en forma de excremento o mezcla de agua y anhídrido carbónico, todas esas moléculas se remodelan, componen y recomponen. La molécula es una realidad y tiene una identidad química específica.

Sabemos, por otra parte, que los átomos que forman las moléculas son los componentes que podemos considerar últimos por lo que respecta a nuestra lectura cotidiana de la realidad. Son 92 átomos «naturales» y unos 110 si sumamos lo que podemos producir en el laboratorio; pero aunque tengan una importancia fundamental, por estar las moléculas hechas de átomos, en realidad, como acabamos de decir, son las moléculas las que tienen identidad química y bioquímica. El químico, o cualquiera que fraccione cuerpos orgánicos o inorgánicos todo lo que pueda, llega al final a los átomos. En el cuerpo humano hay unos veinte tipos de átomos, algunos de importancia fundamental como el hidrógeno, el oxígeno, el carbono, el nitrógeno, el azufre, el fósforo, y otros de importancia secundaria pero también bastante frecuentes.

Hoy tenemos pruebas de que los átomos poseen asimismo una estructura interna, al contrario de lo que afirmaban las primeras teorías atomísticas griegas. La visión arcaica de los átomos tiene muy poco que ver con la moderna, pero la palabra se ha conservado: el átomo (indivisible) y las ideas del antiguo atomismo ayudaron mucho a los científicos de los siglos XVIII y XIX a desarrollar conceptos. En realidad, el gran público y también muchos expertos aceptaron lentamente la idea del átomo y de la molécula, hasta el punto de que un gran científico como Boltzmann se suicidó en Duino, Ita-

lia, entre otras razones porque nadie lo tomaba en serio cuando usaba científicamente el concepto de molécula, del que todos hablaban pero que consideraban una entidad difícil de especificar y más bien una forma abstracta de ilustrar la realidad. Sin embargo, la comprensión de la estructura discreta de la materia fue un cambio fundamental y hoy todos sabemos que la molécula y los átomos que la componen existen, como demuestra el hecho de que hoy se mencione tanto, incluso demasiado, el ADN, en frases como «en el ADN de los italianos está la pizza» o cuando un futbolista dice que «ganar está en nuestro ADN». Estas frases nos hacen sonreír, pero indican hasta qué punto la palabra ha calado en nuestra vida cotidiana (entre paréntesis, nuestro ADN es una de las moléculas más largas y complejas que existen en la naturaleza, porque no está hecha de decenas o cientos de átomos, sino nada menos que de miles de millones unidos entre sí).

Esta era la situación a principios del siglo xx. Poco después, hacia 1910-1915, los físicos y químicos empezaron a meter las narices en el interior de las moléculas y de los átomos y quedaron nuevamente sorprendidos al ver que, del mismo modo que en el universo estamos rodeados de vacío, también los componentes subatómicos están inmersos en el vacío. Es un vacío muy particular, que llamamos vacío cuántico, pero no deja de ser vacío. Pongamos un ejemplo. Todos sabemos representar un átomo, aunque sea a escala «no calibrada», con electrones girando vertiginosamente en torno a un núcleo compuesto por protones y neutrones «pegados». Si aplicamos las consideraciones que hemos hecho antes para escalar la distancia entre la Tierra y Próxima Centauri, llegamos a la desconcertante conclusión de que, si la dimensión del átomo de hidrógeno —es decir, la de la órbita de su único electrón girando alrededor de su único protón— fuera como la circunferencia externa del estadio San Paolo de Nápoles,

¡el electrón sería como una mota de polvo y el núcleo atómico como un grano de pimienta situado en el centro del campo! Átomo hecho esencialmente de nada...

Digamos, de pasada, que la palabra «núcleo» se ha hecho tristemente famosa por la bomba termonuclear y por los problemas asociados a un posible, aunque raro, fallo en el funcionamiento de las centrales nucleares, hasta el punto de que una técnica de investigación inofensiva y utilísima en medicina como es la «resonancia magnética nuclear» ha sido rebautizada «resonancia magnética» a secas, porque la palabra «nuclear» asustaba a los usuarios-pacientes. Pero el núcleo existe en todos nuestros átomos, del más pequeño al más grande. En el átomo más simple, el del hidrógeno, un electrón de carga eléctrica negativa «gira» en torno al núcleo —pronto veremos que no es exactamente así—, el cual está constituido por una única partícula que llamamos protón, de carga positiva. Naturalmente, no todos los átomos son tan elementales, pero la estructura es más o menos la misma siempre. El núcleo puede ser más grande, puede contener incluso cientos de protones y de neutrones, estos últimos sin carga eléctrica, pero ocupa siempre ese espacio mínimo que hemos ilustrado con la metáfora del campo de fútbol.

Así pues, la paradoja de la que podemos partir es esta doble posición inesperada en la que nos hallamos: somos insignificantes en el vacío del espacio cósmico, y la materia que nos rodea y compone está formada por átomos, en cuyo interior la parte tangible, es decir, el núcleo, no es sino un corpúsculo en medio de un espacio mucho más grande y vacío. Es una conclusión sorprendente, como tantas otras que arroja el estudio de la naturaleza. En inglés hay un adjetivo específico, *counterintuitive*, para designar lo contrario de lo que nos parecería natural. Toda la física moderna es «contraintuitiva» y en particular lo es el hecho de que los átomos, con cuya

consistencia y aun dureza hemos medido nuestra vida todos estos milenios, estén constituidos prácticamente de espacio vacío, carente de materia. Pero entonces, si el mundo está hecho de nada, ¿qué lo mantiene en pie? ¿Qué da a la materia su aparente rigidez? ¿Por qué no podemos traspasar una pared, dado que tanto nosotros como la pared somos esencialmente volúmenes vacíos? La causa de la rigidez de los cuerpos son las fuerzas que se ejercen entre las partículas que constituyen los átomos y entre aquellas, aún más fundamentales, que los componen. Estas fuerzas, de atracción o de repulsión, impiden que las partículas se acerquen o se alejen libremente, fijan globalmente sus posiciones relativas en la materia «sólida» y determinan, de hecho, una estructura estable y compacta.

Las fuerzas o las interacciones, como se dice en el lenguaje de la física subnuclear, desempeñan en el microcosmos un papel predominante, comparable con el de la materia en la física clásica. Ya hemos dicho que, dadas las dimensiones de sus componentes fundamentales, la materia está esencialmente vacía. Está vacío el átomo en cerca del 99,99999999999999 por ciento de su volumen, y están vacíos el protón y el neutrón en el 99,9999999 por ciento del suyo. En efecto: estos últimos, como el átomo, no son elementales, sino que tienen estructura interna. Este fue el gran descubrimiento que hicieron los físicos en la década de 1970 cuando trabajaban en los primeros aceleradores de gran energía. Dentro de los protones y los neutrones existen minúsculas entidades que se persiguen frenéticamente como animales enjaulados: los quarks. Son los elementos que forman la materia nuclear (protones y neutrones) y todas las demás partículas exóticas que vivieron en tiempos remotos justo después del Big Bang y que nuestros experimentos de hoy día resucitan, aunque solo sea por un instante.

Por lo que sabemos, en la naturaleza hay cuatro fuerzas o

interacciones fundamentales: la gravitatoria, la electromagnética, la nuclear débil y la nuclear fuerte, y sus respectivas intensidades dependen de la distancia que haya entre los objetos. La primera de las interacciones que conocimos, la gravedad, es también, cuantitativamente hablando, la menos relevante de todas, al menos en el mundo de las partículas elementales. La fuerza de atracción gravitatoria entre dos electrones, por ejemplo, es del todo desdeñable comparada con la fuerza de repulsión coulombiana generada por la carga eléctrica (igual) de los mismos electrones. Sin adentrarnos en complejas consideraciones físicas, podemos decir que la masa de las partículas «genera» la fuerza gravitatoria igual que su carga eléctrica crea la fuerza electromagnética. Pero la intensidad de esta última es unas 10^{37} veces mayor que la gravitatoria a la escala de las distancias típicas de las partículas. Esto explica por qué, en el balance general, la fuerza de repulsión eléctrica entre dos electrones predomina sobre la débil fuerza gravitatoria.

Ahora bien, la debilidad de la fuerza gravitatoria parece estar en contradicción con la visibilísima interacción que se da entre planetas, estrellas y galaxias, y con la intensidad de la fuerza de atracción de todos los cuerpos materiales hacia el centro de la Tierra. Los objetos caen en virtud de su masa, a veces de manera estruendosa y espectacular; la Tierra y la manzana de Newton se atraen recíprocamente y el Sol mantiene a nuestro planeta en una órbita de 365 días precisamente por la atracción gravitatoria. Sin embargo, la gravedad es la fuerza más débil cuando consideramos una partícula. Un kilogramo de hierro tiene un «peso» apreciable solo porque contiene unos 10^{25} átomos, cada uno de los cuales está constituido por 26 electrones y 56 protones y neutrones, en el tipo atómico (isótopo) más común de hierro.

En cualquier caso, la pregunta por la efectiva rigidez de

la materia sigue sin respuesta. Tratemos de comprenderlo con un ejemplo. Si quisiéramos hacer pasar la mano a través de una pared, nos veríamos ejerciendo una presión que haría que los electrones de los átomos de la superficie del miembro chocasen con los electrones de los átomos del cemento de la pared, organizados en una estructura ordenada y rígida, con fuertes vínculos entre sí, al contrario de lo que ocurre con líquidos y gases. La gran intensidad de la fuerza de repulsión eléctrica concomitante y cohesionada que existe entre los numerosos electrones implicados impide la compenetración de mano y pared, aunque ambas estén constituidas sustancialmente de espacio vacío. En realidad, la situación es algo más compleja, porque, según las leyes de la física atómica, es imposible compactar mucho los átomos y reducir el «enorme» espacio que existe entre los electrones y el núcleo, así como entre los diferentes electrones.

Lo mismo cabe decir de la fuerza nuclear fuerte, que es la que mantiene unidos protones y protones, neutrones y neutrones y protones y neutrones —y los quarks que contienen—, indistintamente y con la misma intensidad cuando forman el núcleo atómico. Que es fuerte se comprende por el hecho de que debe competir y vencer la fuerza de repulsión opuesta debida a la carga eléctrica de los protones. Si no fuera así, la repulsión electromagnética impediría la existencia de núcleos estables y, por tanto, de la materia ordinaria. La fuerza fuerte que existe entre dos protones «casi en contacto» es unas cien veces más intensa que la electromagnética a la misma distancia.

Por cierto que cuando hablamos de interior de un átomo o de un protón, tendemos a imaginar intuitivamente (y erróneamente) que existe como una superficie que separa el interior del exterior de estas entidades, una especie de esfera que, por ejemplo en el caso del protón, contiene los quarks. En reali-

dad, la dimensión del átomo viene determinada «dinámicamente» por la posición de sus electrones más exteriores, mientras que las del protón y del neutrón las determina el movimiento de los quarks que los componen: lo que demuestra que conviene no fiarnos de las ideas fácilmente intuitivas...

La cuarta interacción que existe en la naturaleza es la fuerza nuclear débil. Es probablemente la más exótica y es responsable, por ejemplo, de la desintegración o decaimiento beta —una reacción por la cual el neutrón de un núcleo se transforma en un protón, un electrón y un neutrino—, así como del mismo funcionamiento del Sol y de las demás estrellas. Todas las partículas están sometidas a la fuerza débil. Sin embargo, como bien da a entender el nombre, su intensidad es unas cien mil veces menor que la de la fuerza electromagnética. La fuerza débil solo predomina y puede medirse cuando las demás interacciones están inactivas o las impiden otras leyes físicas. Un ejemplo son los neutrinos: sobre estos no actúa la interacción fuerte y, como no tienen carga eléctrica, tampoco están sujetos a la fuerza electromagnética. La fuerza débil es la única manera que tienen de interactuar con las demás partículas y por tanto también con la materia ordinaria. Es una peculiaridad más de los fantasmales neutrinos.

Es evidente que, a escala macroscópica y con respecto a nuestra experiencia cotidiana, las acciones y los efectos asociados a fuerzas dependen sobre todo de la gravedad y del electromagnetismo. Cuerpos que caen, satélites que orbitan gracias a la gravedad, objetos sometidos a impulsos y presiones mecánicas, reacciones y procesos químicos, vínculos entre átomos que forman moléculas, fuego, explosiones, etcétera, se deben, en última instancia, a la interacción electromagnética en la que intervienen electrones y protones atómicos. En muchos de estos casos, las fuerzas se aplican a

grandes sistemas estadísticos de partículas, que multiplican el efecto de la interacción elemental que actúa individualmente sobre cada una de esas partículas. Si no fuera por el exótico microcosmos y por *el Sol y las demás estrellas*, no tendríamos necesidad de las otras dos fuerzas nucleares, la débil y la fuerte.

También el radio de acción de las cuatro interacciones difiere mucho. Mientras que la fuerza gravitatoria y la electromagnética, muy intensas en distancias cortas, se extienden formalmente hasta distancias infinitas, si bien disminuyendo en intensidad, la interacción fuerte solo se ejerce si las partículas distan menos de 10^{-13} cm, que vienen a ser las dimensiones nucleares. La interacción débil, incluso, solo actúa si la distancia entre las partículas es menor de 10^{-16} cm. Al variar la distancia también cambia la relación de intensidad entre las fuerzas. Para distancias muy muy pequeñas, la fuerza débil resulta incluso más intensa que la electromagnética, y para distancias aún más cortas, la fuerza gravitatoria es también intensísima. Condiciones estas que, como veremos, se dieron solo en los brevísimos instantes posteriores al Big Bang. Uno de los principales éxitos de la física de las partículas elementales ha sido, en efecto, demostrar que las fuerzas electromagnética y débil constituyeron una única interacción (unificada) en los albores del universo, pocos instantes después del Big Bang. Esta conclusión hace plausible la hipótesis, muy interesante y rica en consecuencias filosóficas, de que antes incluso, al principio de todo, las cuatro fuerzas hoy presentes en la naturaleza estuvieran unidas en una sola, tal como sostiene la llamada «teoría del todo» con la que han soñado generaciones de científicos a lo largo de los siglos.

Una visión clásica del concepto de interacción entre partículas es la del campo de fuerza, usada en física clásica para explicar los efectos gravitatorios y electromagnéticos. Consi-

deremos dos hipotéticas partículas de igual masa, la primera con carga eléctrica -1 y la segunda con carga $+1$ (en unidades de la carga fundamental del electrón e , equivalente a $1,6 \cdot 10^{-19}$ culombios). La fuerza llamada culombiana que se ejerce entre esas dos partículas cargadas es proporcional al producto de sus cargas eléctricas dividido por el cuadrado de la distancia que las separa. La fuerza resultante será de repulsión si la carga es la misma y de atracción si es opuesta. Pero también podemos interpretar la interacción entre partículas suponiendo que una de ellas crea a su alrededor un campo eléctrico, una especie de perturbación del espacio, de suerte que, cuando otra partícula cargada se acerca, se ejerce una fuerza resultante igual al producto de la intensidad del campo eléctrico en ese punto por el valor de la carga eléctrica de la segunda partícula. Las dos fórmulas dan, obviamente, el mismo resultado e interpretan correctamente el efecto de la interacción entre cargas, es decir, la fuerza que se ejerce entre ellas. Lo mismo vale decir de la gravedad, con tal de sustituir la carga eléctrica que produce el campo eléctrico por la carga gravitatoria, o sea, la masa. Llegados a este punto, nada nos impide postular la existencia de una carga «fuerte» y una carga «débil» para dar cuenta de las otras dos fuerzas fundamentales. Es exactamente lo que ocurre.

Pero también podemos usar un planteamiento alternativo, que resulta muy práctico para describir la interacción entre microscópicas partículas elementales. Imaginemos dos barcas que flotan inmóviles una junto a otra en la superficie de un lago. Dos experimentadores, de frente y de pie en cada una de las barcas, empiezan a intercambiarse un balón. Las embarcaciones irán separándose lentamente por efecto de una fuerza o, si lo preferimos, de una interacción de repulsión. Las barcas son nuestras partículas y el balón es el «mediador» de la fuerza, otra partícula, que, transfiriendo energía

entre las dos primeras —en realidad cantidad de movimiento, es decir, el producto de la masa del mediador por su velocidad (mv)—, hace que interactúen. Con un poco de imaginación, y haciendo que nuestros experimentadores se pongan espalda contra espalda y se intercambien un bumerán (nuestro mediador), podemos explicar también las fuerzas de atracción.

La interpretación «corpuscular» de las interacciones, según el esquema de los mediadores, es una forma muy eficaz de describir las cuatro fuerzas fundamentales y hacer cálculos físicos, además de que conceptualmente equivale a la visión de los campos de fuerza. Por lo demás, esta última presenta algunos aspectos no totalmente obvios. Por ejemplo, cuando decimos que una carga eléctrica genera a su alrededor un campo, no debemos olvidar que ese campo no se establece instantáneamente en todo el espacio: la señal de la presencia de la carga que lo genera puede propagarse como máximo a la velocidad de la luz; una segunda partícula situada en un punto arbitrariamente lejano de la primera tendrá que esperar un tiempo antes de saber que su hermana existe.

Con la visión corpuscular, estos conceptos resultan más naturales. Si el mediador es un corpúsculo sin masa, las dos partículas interactuantes separadas por una longitud l sentirán su presencia recíproca al cabo de un tiempo $t = l/c$, donde c es la velocidad de la luz, cosa natural para partículas sin masa, las únicas capaces de viajar a la velocidad de la luz. En el caso de un mediador dotado de masa, ese tiempo será, según el mismo principio, más largo, pues ninguna partícula masiva puede viajar a la velocidad c . Sin embargo, estos argumentos son demasiado académicos para que, dadas las cortísimas distancias de las que hablamos y las altas energías de las partículas, no se cometa el gran error de considerar que

las velocidades de los mediadores son todas, de hecho, iguales a la de la luz.

Los mediadores de las cuatro interacciones fundamentales son el gravitón, para la fuerza gravitatoria, aún no detectado experimentalmente; el fotón, para la electromagnética; el gluón, para la nuclear fuerte, y las partículas W y Z, para la interacción débil. Estas dos últimas, al contrario de las demás, tienen masa, incluso una masa relativamente grande, ochenta y noventa veces mayor que la del protón, respectivamente. La W y la Z fueron descubiertas en el CERN a principios de los años ochenta y por este descubrimiento Carlo Rubbia obtuvo el Premio Nobel de Física en 1984. Una conclusión que corrobora la naturaleza corpuscular y discreta tanto de la materia como de las fuerzas que la gobiernan.