

CARLO ROVELLI



SIETE BREVES
LECCIONES DE
FÍSICA

Todo lo que necesitas saber sobre física,
el universo y nuestro lugar en el mundo
en siete brillantes lecciones.



ANAGRAMA
Colección Argumentos

Índice

PORTADA

PREFACIO

LECCIÓN PRIMERA. La teoría más hermosa

LECCIÓN SEGUNDA. Los cuantos

LECCIÓN TERCERA. La arquitectura del cosmos

LECCIÓN CUARTA. Partículas

LECCIÓN QUINTA. Granos de espacio

LECCIÓN SEXTA. La probabilidad, el tiempo y el calor de los agujeros
negros

PARA TERMINAR: NOSOTROS

NOTAS

CRÉDITOS

PREFACIO

Estas lecciones se han escrito pensando en quienes desconocen la ciencia moderna o la conocen poco. En conjunto, componen una rápida panorámica de algunos de los aspectos más relevantes y fascinantes de la gran revolución acaecida en la física del siglo xx, y, sobre todo, de las cuestiones y misterios que dicha revolución ha planteado. Porque la ciencia nos enseña a comprender mejor el mundo, pero también nos da una idea de la vastedad de lo que aún ignoramos.

La primera lección trata de la teoría de la relatividad general de Albert Einstein, la «más hermosa de las teorías». La segunda, de la mecánica cuántica, donde se ocultan los aspectos más desconcertantes de la física moderna. La tercera está dedicada al cosmos: la arquitectura del universo que habitamos. La cuarta, a las partículas elementales. La quinta, a la gravedad cuántica: el actual esfuerzo por construir una síntesis de los grandes descubrimientos del siglo xx. La sexta trata de la probabilidad y el calor de los agujeros negros. El último capítulo del libro, para terminar, se centra de nuevo en nosotros, y en él se plantea cómo podemos llegar a concebirnos en el extraño mundo descrito por esta física.

Las lecciones amplían una serie de artículos publicados por el autor en el suplemento *Domenica* del diario italiano *Il Sole 24 Ore*. El autor desea dar especialmente las gracias a Armando Massarenti, que tuvo el mérito de abrir a la ciencia las páginas culturales del dominical, poniendo de relieve el papel de una parte integrante y vital de la cultura.

LECCIÓN PRIMERA

La teoría más hermosa

De joven, Albert Einstein pasó un año entero haraganeando ocioso. Si no se pierde el tiempo no se llega a ningún sitio, algo que los padres de los adolescentes olvidan a menudo. Estaba en Pavía. Había vuelto con su familia tras dejar los estudios en Alemania, donde no soportaba el rigor del instituto. Era a comienzos de siglo, y en Italia se iniciaba la Revolución Industrial. Su padre, que era ingeniero, instalaba las primeras centrales eléctricas en la llanura del Po. Albert leía a Kant y a ratos perdidos asistía a clases en la Universidad de Pavía: por diversión, sin matricularse ni hacer exámenes. Es así como se llega a ser científico en serio.

Luego se matricularía en la Universidad de Zúrich y se sumergiría en la física. Pocos años después, en 1905, enviaba tres artículos a la principal revista científica de la época, los *Annalen der Physik*. Cada uno de los tres era digno de un Premio Nobel. El primero mostraba que los átomos realmente existen. El segundo abría la puerta a la mecánica de los cuantos, de la que hablaré en la próxima lección. El tercero presentaba su primera teoría de la relatividad (hoy llamada «relatividad restringida»), la teoría que explica que el tiempo no transcurre igual para todos: dos gemelos se encuentran con que ya no tienen la misma edad si uno de ellos ha viajado a gran velocidad.

Einstein se convierte de repente en un científico de renombre y recibe ofertas de trabajo de varias universidades. Pero algo lo turba: su teoría de la relatividad, por muy célebre que se haya hecho de inmediato, no cuadra con cuanto sabemos sobre la gravedad, es decir, acerca de cómo caen las cosas. Se da cuenta de ello escribiendo una reseña sobre su teoría, y se pregunta si la vetusta y rimbombante «gravitación universal» del gran padre Newton no debería ser revisada a su vez a fin de hacerla compatible con la nueva relatividad. Se sumerge en el problema. Harán falta diez años para resolverlo. Diez años de enloquecidos estudios, tentativas, errores, confusión, artículos equivocados, ideas fulgurantes, ideas erróneas... Por fin, en noviembre de 1915, da a la imprenta un artículo con la solución completa: una nueva teoría de la gravedad, a la que da el nombre de «teoría de la relatividad general», su

obra maestra. La «teoría científica más hermosa», la denominaría el gran físico ruso Lev Landau.

Hay obras maestras absolutas que nos emocionan intensamente: el *Réquiem* de Mozart, la *Odisea*, la Capilla Sixtina, *El rey Lear*... Para captar todo su esplendor quizá debamos realizar cierto aprendizaje. Pero el premio es la pura belleza. Y no sólo eso: también que nuestros ojos se abran a una nueva mirada al mundo. La relatividad general, la joya de Albert Einstein, es una de ellas.

Recuerdo la emoción cuando empecé a entender algo. Era verano. Estaba en una playa de Calabria, en Condofuri, inmerso en el sol de esta región helénica del Mediterráneo,¹ en la época de mi último año de universidad. En los períodos de vacaciones es cuando mejor se estudia, porque no se tienen las distracciones de la escuela. Estudiaba un libro con los márgenes roídos por los ratones, ya que lo había utilizado para tapar las madrigueras de esas pobres bestezuelas, por la noche, en la casa desvencijada y algo hippie situada en la colina umbra adonde acudía para huir del aburrimiento de las clases universitarias de Bolonia. De vez en cuando levantaba los ojos del libro para contemplar el centelleo del mar: me parecía ver la curvatura del espacio y del tiempo imaginada por Einstein.

Era como magia: como si un amigo me susurrara al oído una extraordinaria verdad oculta, y de repente apartara un velo de la realidad para desvelar un orden más simple y profundo. Desde el momento en que aprendimos que la Tierra es redonda y gira como una peonza enloquecida comprendimos que la realidad no es como se nos presenta: cada vez que entrevemos un nuevo fragmento de ella nos produce emoción. Otro velo que cae.

Pero entre los numerosos saltos adelante de nuestro saber, ocurridos uno tras otro a lo largo de la historia, el realizado por Einstein probablemente no tiene parangón. ¿Por qué? En primer lugar, porque una vez se entiende cómo funciona, la teoría resulta ser de una simplicidad asombrosa. Resumo la idea:

Newton trató de explicar la razón por la que las cosas caen y los planetas giran. Imaginó una «fuerza» que tira de todos los cuerpos unos hacia otros: la llamó «fuerza de gravedad». Cómo hacía esa fuerza para tirar de cosas que estaban lejos unas de otras, sin que hubiera nada en medio, era algo que no nos era dado saber, y el gran padre de la ciencia se guardó cautelosamente de aventurar hipótesis. Newton también imaginó que los cuerpos se movían en

el espacio, y que el espacio era un gran contenedor vacío, una gran caja para el universo. Una inmensa estantería en la que los objetos discurren en línea recta hasta que una fuerza los hace curvarse. De qué estaba hecho ese «espacio», contenedor del mundo, inventado por Newton, era algo que tampoco nos era dado saber.

Pero pocos años antes del nacimiento de Albert, dos grandes físicos británicos, Faraday y Maxwell, añadieron un ingrediente al frío mundo de Newton: el campo electromagnético. El campo es una entidad real difundida por todas partes, que transporta las ondas de radio, llena el espacio, puede vibrar y ondular como la superficie de un lago, y «pone en circulación» la fuerza eléctrica. Einstein se sentirá fascinado ya de muchacho por el campo electromagnético, que hace girar los rotores de las centrales eléctricas que construye papá, y pronto comprende que también la gravedad, como la electricidad, debe ser transportada por un campo: ha de existir un «campo gravitatorio», análogo al «campo eléctrico»; e intenta entender cómo puede estar constituido dicho campo gravitatorio y qué ecuaciones pueden describirlo.

Y aquí llega la idea extraordinaria, el puro genio: el campo gravitatorio no está *difundido* en el espacio: el campo gravitatorio es el espacio. Ésa es la idea de la teoría de la relatividad general.

El «espacio» de Newton, en el que se mueven las cosas, y el «campo gravitatorio», que transporta la fuerza de gravedad, son una misma cosa.

Es una revelación. Una impresionante simplificación del mundo: el espacio ya no es algo distinto de la materia, es uno de los componentes «materiales» del mundo. Una entidad que ondula, se dobla, se curva, se tuerce. No estamos contenidos en una invisible estantería rígida: nos hallamos inmersos en un gigantesco molusco flexible. El Sol dobla el espacio en torno a sí, y la Tierra no gira a su alrededor atraída por una misteriosa fuerza, sino porque discurre en línea recta en un espacio que se inclina. Como una bolita que rodara en un embudo: no hay «fuerzas» misteriosas generadas por el centro del embudo; es la propia naturaleza curva de las paredes la que hace girar la bolita. Los planetas giran alrededor del Sol y las cosas caen porque el espacio se curva.

¿Cómo describir esta curvatura del espacio? El más grande matemático del siglo XIX, Carl Friedrich Gauss, «príncipe de los matemáticos», había ideado la formulación matemática que describía las superficies curvas bidimensionales, como la superficie de las colinas. Luego le había pedido a

un buen alumno suyo que la generalizara a los espacios curvos de tres o más dimensiones. Y el alumno, Bernhard Riemann, había elaborado una pesada tesis doctoral, de las que parecen completamente inútiles.

El resultado era que las propiedades de un espacio curvo son captadas por cierto objeto matemático que hoy conocemos como curvatura de Riemann y representamos con una «R». Einstein escribe entonces una ecuación que dice que R es proporcional a la energía de la materia. Es decir, el espacio se curva allí donde hay materia. Eso es todo. La ecuación ocupa media línea, nada más. Una visión –el espacio que se curva– y una ecuación.

Pero dentro de esta ecuación hay todo un universo rutilante. Y aquí se inicia la riqueza mágica de la teoría. Una fantasmagórica sucesión de predicciones que parecen los delirios de un loco, pero que, sin embargo, han sido todas ellas verificadas por la experiencia.

Para empezar, la ecuación describe cómo se curva el espacio alrededor de una estrella. A causa de esta curvatura, no sólo los planetas orbitan alrededor de la estrella, sino que también la luz deja de viajar en línea recta y se desvía. Einstein predice que el Sol desvía la luz. En 1919 se realiza la medición, y resulta ser cierto.

Pero no es sólo el espacio el que se curva: también lo hace el tiempo. Einstein predice que el tiempo transcurre más deprisa arriba y más despacio abajo, cerca de la Tierra. Se mide, y resulta ser cierto. Por poca diferencia, pero el gemelo que ha vivido en el mar se encuentra con que el gemelo que ha vivido en la montaña es algo más viejo que él. Y es sólo el principio.

Cuando una gran estrella ha quemado todo su combustible (el hidrógeno), termina por apagarse. Lo que queda ya no se sustenta por el calor de la combustión y se colapsa aplastado bajo su propio peso, hasta curvar tan fuertemente el espacio que llega a precipitarse dentro de un auténtico agujero. Son los famosos «agujeros negros». Cuando yo estudiaba en la universidad, éstas eran predicciones poco creíbles de una teoría esotérica. Hoy se observan en el cielo a centenares, y son estudiadas con todo detalle por los astrónomos. Pero hay más.

El espacio entero puede extenderse y dilatarse; mejor dicho, la ecuación de Einstein indica que el espacio no puede mantenerse inmóvil, *debe* estar en expansión. En 1930 se observó de hecho la expansión del universo. La misma ecuación predice que la expansión tiene que ser el resultado de la explosión de un joven universo pequeñísimo y calentísimo: es el Big Bang. Una vez

más, nadie lo cree, pero las pruebas se acumulan, hasta que se observa en el cielo la «radiación cósmica de fondo»: el difuso resplandor que queda del calor de la explosión inicial. La predicción de la ecuación de Einstein es correcta.

Y, de nuevo, la teoría predice que el espacio se encrespa como la superficie del mar; los efectos de esas «ondas gravitatorias» se observan en el cielo en las estrellas binarias, y encajan con las previsiones de la teoría con la pasmosa precisión de una parte sobre cien mil millones. Y así sucesivamente.

En suma, la teoría describe un mundo colorido y asombroso, donde explotan universos, el espacio se precipita en agujeros sin salida, el tiempo se ralentiza al descender sobre un planeta, y las ilimitadas extensiones del espacio interestelar se encrespan y ondean como la superficie del mar..., y todo esto, que iba surgiendo poco a poco de mi libro roído por los ratones, no era una fábula contada por un idiota en un arrebato de furor, o el efecto del ardiente sol mediterráneo de Calabria, una alucinación sobre el centelleo del mar. Era realidad.

O mejor, una mirada a la realidad, algo menos velada que la de nuestra ofuscada banalidad cotidiana. Una realidad que parece hecha, también ella, de la materia de la que están hechos los sueños, pero, sin embargo, más real que nuestro nebuloso sueño cotidiano.

Todo esto es el resultado de una intuición elemental: el espacio y el campo son una misma cosa. Y de una sencilla ecuación, que no me resisto a copiar aquí; aunque seguramente mi lector no sabrá descifrarla, quisiera que al menos constatará su gran simplicidad:

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = T_{ab}$$

Eso es todo. Ciertamente, se requiere seguir cierto aprendizaje para digerir las matemáticas de Riemann y dominar la técnica necesaria para leer esta ecuación. Hace falta algo de empeño y esfuerzo. Pero menos del que se necesita para llegar a sentir la enrarecida belleza de uno de los últimos cuartetos de Beethoven. En uno y otro caso, el premio es la belleza, y unos ojos nuevos para ver el mundo.

LECCIÓN SEGUNDA

Los cuantos

Los dos pilares de la física del siglo xx, la relatividad general, de la que he hablado en la primera lección, y la mecánica cuántica, de la que voy a hablar aquí, no podrían ser más distintos.

Ambas teorías nos enseñan que la estructura fina de la naturaleza es más sutil de lo que nos parece. Pero la relatividad general es una piedra preciosa compacta: concebida por una sola mente, la de Albert Einstein, es una visión sencilla y coherente de gravedad, espacio y tiempo. La mecánica cuántica o «teoría de los cuantos», en cambio, ha obtenido un éxito experimental sin parangón y ha traído consigo aplicaciones que han transformado nuestra vida cotidiana (el ordenador con el que estoy escribiendo, por ejemplo), pero un siglo después de su nacimiento todavía permanece envuelta en un extraño hábito de incomprendibilidad y misterio.

Suele decirse que la mecánica cuántica nace exactamente en el año 1900, casi como inaugurando un siglo de intenso pensamiento. El físico alemán Max Planck calcula el campo eléctrico en equilibrio en el interior de una caja caliente. Para ello utiliza un truco: imagina que la energía del campo está distribuida en «cuantos», es decir, en paquetes o grumos de energía. El procedimiento conduce a un resultado que reproduce perfectamente cuanto se mide (y, por lo tanto, tiene que ser de algún modo correcto), pero choca con todo lo que se sabe en esa época, ya que por entonces se considera que la energía es algo que varía de forma continua y no hay razón alguna para tratarla como si estuviera hecha de pequeños ladrillos.

Para Max Planck, tratar la energía como si estuviera hecha de paquetes finitos era un extraño truco de cálculo, y ni siquiera él mismo entendía la razón de su eficacia. Será de nuevo Albert Einstein quien comprenda, cinco años después, que los «paquetes de energía» son reales.

Einstein nos enseña que la luz está hecha de paquetes: partículas de luz. Hoy los llamamos «fotones». En la introducción de su trabajo sobre la materia escribe:

Me parece que las observaciones asociadas a la fluorescencia, a la producción de rayos catódicos, a la radiación electromagnética que sale de una caja y otros fenómenos similares vinculados a la emisión y la transformación de la luz, resultan más comprensibles si se asume que la energía de la luz se distribuye en el espacio de forma dis-continua. Aquí considero la hipótesis de que la energía de un rayo de luz no se distribuye de forma continua en el espacio, sino que, en cambio, consiste en un número finito de «cuantos de energía» que se localizan en puntos del espacio, se mueven sin dividirse, y son producidos y absorbidos como unidades individuales.

Estas líneas, simples y claras, constituyen la verdadera partida de nacimiento de la teoría de los cuantos. Nótese el maravilloso «Me parece...» inicial, que recuerda al «Yo pienso...» con el que Darwin introduce en sus libretas la gran idea de que las especies evolucionan, o la «vacilación» de la que habla Faraday cuando presenta en su libro el revolucionario concepto del campo eléctrico. El genio titubea.

El trabajo de Einstein es acogido inicialmente por sus colegas como la necedad juvenil de un chico brillante. Luego ese mismo trabajo le valdrá el Nobel. Si Planck es el padre de la teoría, Einstein es el progenitor que la hace crecer.

Pero, como todos los hijos, la teoría sigue luego su propia andadura y Einstein deja de reconocerla. Durante las décadas de 1910 y 1920, es el danés Niels Bohr quien guía su desarrollo. Es él quien entiende que la energía de los electrones de los átomos puede adoptar sólo ciertos valores «cuantificados», como la energía de la luz, y, sobre todo, que los electrones sólo pueden «saltar» de una órbita atómica a otra con energías permitidas, emitiendo o absorbiendo un fotón cuando saltan. Son los famosos «saltos cuánticos». Es en su instituto, en Copenhague, donde se reúnen las jóvenes mentes más brillantes del siglo para tratar de poner orden en estos incomprensibles comportamientos del mundo atómico y construir una teoría coherente.

En 1925 aparecen finalmente las ecuaciones de la teoría, que vienen a reemplazar íntegramente a la mecánica de Newton. Es difícil imaginar un triunfo mayor. De repente todo cuadra, y todo se puede calcular. Baste un ejemplo: ¿recuerda el lector la tabla periódica de los elementos, la de

Mendeléiev, que enumera todas las posibles sustancias elementales de las que está hecho el universo, desde el hidrógeno hasta el uranio, y que colgaba en las paredes de tantas aulas escolares? ¿Por qué los elementos son precisamente los que aparecen ahí enumerados, y por qué la tabla periódica tiene precisamente esa estructura, con esos períodos, y los elementos tienen precisamente esas propiedades? La respuesta es que cada elemento es una solución de la ecuación base de la mecánica cuántica. Toda la química surge de esta sola ecuación.

Quien primero escriba las ecuaciones de la nueva teoría será un jovencísimo genio alemán, Werner Heisenberg, basándose en unas ideas que producen vértigo.

Heisenberg imagina que los electrones *no* existen siempre: existen sólo cuando alguien los mira o, mejor dicho, cuando interaccionan con alguna otra cosa. Se materializan en un lugar, con una probabilidad calculable, cuando chocan contra alguna otra cosa. Los «saltos cuánticos» de una órbita a otra constituyen su única forma de ser reales: un electrón es un conjunto de saltos de una interacción a otra. Cuando nadie lo perturba, no está en ningún lugar concreto. No está en un lugar.

Es como si Dios no hubiera dibujado la realidad con un trazo firme, y se hubiera limitado a una leve línea de puntos.

En la mecánica cuántica ningún objeto tiene una posición definida, salvo cuando tropieza contra alguna otra cosa. Para describirlo a mitad de vuelo entre una interacción y otra, se utiliza una abstrusa función matemática que no habita en el espacio real, sino en abstractos espacios matemáticos.

Pero aún hay más: esos saltos con los que todo objeto pasa de una interacción a otra no se producen de un modo previsible, sino mayoritariamente al azar. No es posible prever dónde aparecerá de nuevo un electrón, sino únicamente calcular la *probabilidad* de que aparezca aquí o allá. La probabilidad asoma la cabeza en el corazón de la física, allí donde parecía que todo estaba regulado por leyes precisas, unívocas e inderogables.

¿Le parece absurdo? También se lo parecía a Einstein, quien, por una parte, proponía a Werner Heisenberg para el Nobel, reconociendo que éste había percibido algo fundamental del mundo, pero, por otra, no perdía ocasión para refunfuñar diciendo que, sin embargo, así no se entendía nada.

Los jóvenes leones del grupo de Copenhague estaban consternados: pero ¿cómo?, ¿precisamente Einstein? ¿Su padre espiritual, el hombre que había

tenido el coraje de pensar lo impensable, ahora se echaba atrás y se asustaba ante aquel nuevo salto hacia lo desconocido que él mismo había provocado? ¿Precisamente Einstein, que nos había enseñado que el tiempo no es universal y el espacio se curva, precisamente él decía ahora que el mundo no puede ser tan extraño?

Niels Bohr le explicó pacientemente a Einstein las nuevas ideas. Pero Einstein ponía reparos, y concebía experimentos mentales para demostrar que las nuevas ideas eran contradictorias: «Imaginemos una caja llena de luz, de la que dejamos escapar por un breve instante un solo fotón...»; así empezaba uno de sus famosos ejemplos, el experimento mental de la «caja de luz». Al final Bohr siempre lograba encontrar la respuesta, rechazar las objeciones. El diálogo prosiguió durante años, pasando por conferencias, cartas, artículos... En el curso de este intercambio los dos grandes hombres tuvieron que retroceder, que cambiar de idea. Einstein tuvo que reconocer que, en efecto, no había contradicción en las nuevas ideas. Bohr hubo de aceptar que las cosas no eran tan sencillas y claras como pensaba al principio. Pero Einstein no quiso ceder sobre el aspecto que para él era clave: que existía una realidad objetiva independiente de quién interaccione con quién. Por su parte, Bohr no quiso ceder con respecto a la validez de la forma profundamente novedosa en que la nueva teoría conceptualizaba lo real. Al final, Einstein aceptó que la teoría era un gigantesco paso adelante en la comprensión del mundo, pero siguió convencido de que las cosas no podían ser tan extrañas, y que detrás tenía que haber una explicación más razonable.

Ha transcurrido un siglo, y nos encontramos en el mismo punto. Las ecuaciones de la mecánica cuántica y sus consecuencias son utilizadas diariamente por físicos, ingenieros, químicos y biólogos, en los ámbitos más diversos. Son extremadamente útiles para toda la tecnología contemporánea. Sin la mecánica cuántica no existirían los transistores. Y, sin embargo, siguen siendo un misterio: no describen qué ocurre en un sistema físico, sino sólo cómo un sistema físico es percibido por otro sistema físico. ¿Y eso qué significa? ¿Significa que la realidad esencial de un sistema es indescriptible? ¿Significa sólo que falta una parte de la historia? ¿O significa, como me parece a mí, que debemos aceptar la idea de que la realidad sólo es interacción?

Nuestros conocimientos aumentan, y aumentan de veras. Nos permiten hacer cosas nuevas que antes ni siquiera imaginábamos. Pero, al aumentar,

plantean nuevas preguntas. Nuevos misterios. Quien utiliza las ecuaciones de la teoría en el laboratorio no suele ocuparse de ello, pero sigue habiendo artículos y congresos de físicos y filósofos interrogándose al respecto; es más, en los últimos años son más numerosos. ¿Qué es la teoría de los cuantos un siglo después de su nacimiento? ¿Una extraordinaria y profunda zambullida en la naturaleza de la realidad? ¿Un error, que funciona por casualidad? ¿Una pieza incompleta de un puzle? ¿O un indicio de algo profundo que afecta a la estructura del mundo y que todavía no hemos asimilado bien?

Cuando muere Einstein, Bohr, su gran rival, tiene palabras de conmovedora admiración hacia él. Cuando, pocos años después, muere Bohr, alguien hace una fotografía de la pizarra en su estudio: hay un dibujo. Representa la «caja llena de luz» del experimento mental de Einstein. Hasta el final, el deseo de confrontarse y entender más. Hasta el final, la duda.

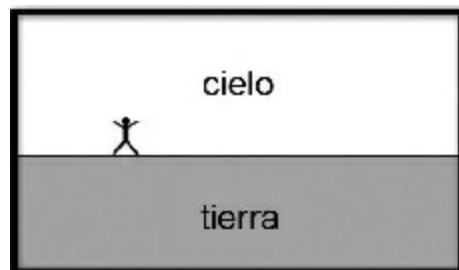
LECCIÓN TERCERA

La arquitectura del cosmos

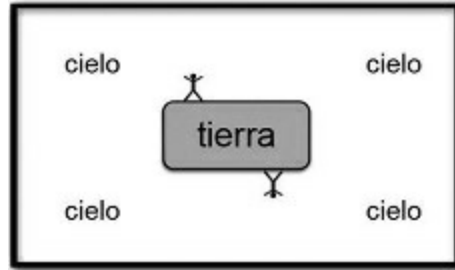
En la primera mitad del siglo xx, Einstein describió la trama del espacio y el tiempo con la teoría de la relatividad, mientras que Bohr y sus jóvenes amigos capturaron en ecuaciones la extraña naturaleza cuántica de la materia. En la segunda mitad del siglo xx, los físicos construyeron sobre esos cimientos, aplicando las dos nuevas teorías a los ámbitos más diversos de la naturaleza: desde el macrocosmos de la estructura del universo hasta el microcosmos de las partículas elementales. Del primero hablaré en esta lección; del segundo, en la siguiente.

Esta lección está hecha sobre todo de sencillos dibujos. El motivo es que la ciencia, antes de estar constituida por experimentos, mediciones, matemáticas, deducciones rigurosas, lo está, sobre todo, por visiones. La ciencia es, ante todo, una actividad visionaria. El pensamiento científico se nutre de la capacidad de «ver» las cosas de manera distinta de como las veíamos antes. Sin grandes pretensiones, quiero intentar ofrecer una muestra de este viaje entre visiones.

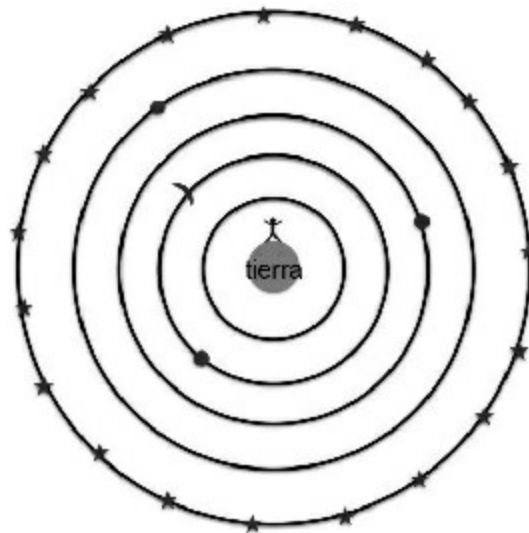
Primera imagen:



Representa el cosmos tal como se concibió durante milenios: abajo la Tierra, arriba el Cielo. La primera gran revolución científica, llevada a cabo por Anaximandro hace veintiséis siglos al tratar de entender cómo era posible que el Sol, la Luna y las estrellas giraran a nuestro alrededor, reemplaza esa imagen del cosmos por esta otra:

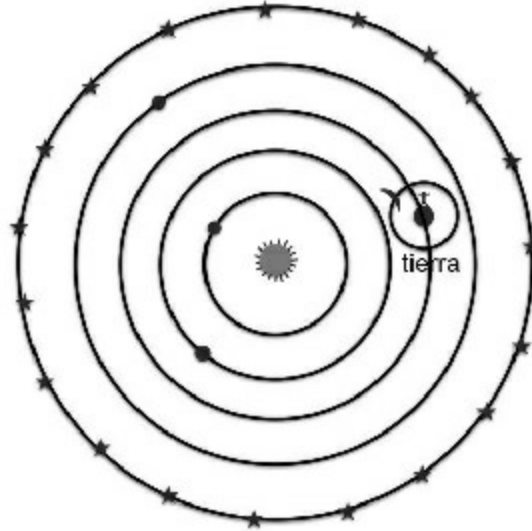


Ahora el Cielo rodea a la Tierra por todas partes, no sólo por arriba, y la Tierra es una gran roca que flota suspendida en el espacio, sin caer. Pronto alguien (quizá Parménides, quizá Pitágoras) se da cuenta de que la forma más razonable para esta Tierra que vuela, para la que todas las direcciones son iguales, es una esfera, y Aristóteles esgrime convincentes argumentos científicos para confirmar la esfericidad de la Tierra y de los cielos que la rodean, por los que discurren los astros celestes. He aquí la imagen del cosmos resultante:



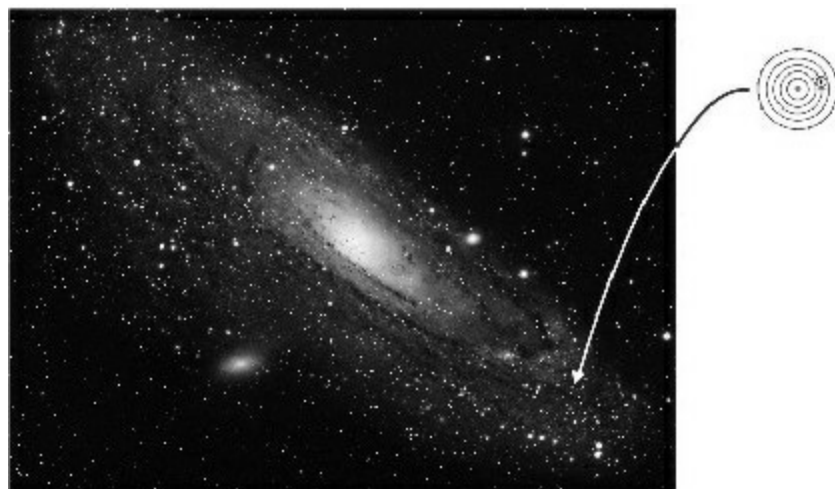
Es el cosmos descrito por Aristóteles en su libro *Sobre el cielo*, y la imagen del mundo que caracterizará a las civilizaciones que circundan el Mediterráneo hasta el final del Medievo. Ésa es la imagen del mundo que Dante estudia en la escuela.

El siguiente salto lo da Copérnico, inaugurando la que se conoce como la «gran revolución científica». El mundo de Copérnico no es muy distinto del de Aristóteles:



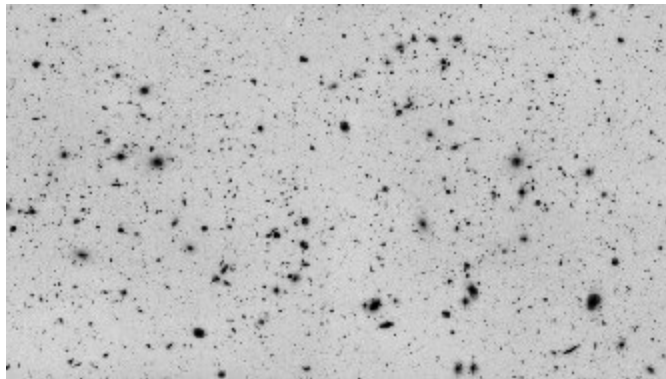
Pero hay una diferencia fundamental: retomando una idea ya considerada en la Antigüedad, y luego abandonada, Copérnico comprende y muestra que nuestra Tierra no está en el centro de la danza de los planetas, donde, en cambio, se sitúa el Sol. Nuestro planeta pasa a ser uno como los demás. Gira a gran velocidad sobre sí mismo y alrededor del Sol.

El avance del conocimiento no se detiene, y pronto nuestros instrumentos mejoran, y aprendemos que el sistema solar es sólo uno entre muchísimos y nuestro Sol es sólo una estrella como las demás. Un granito infinitesimal en una inmensa nube de estrellas, formada por cien mil millones de ellas, la Galaxia:

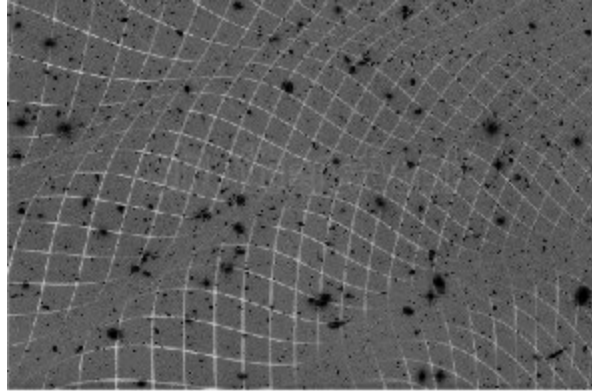


Pero hacia la década de 1930 las precisas mediciones que realizan los

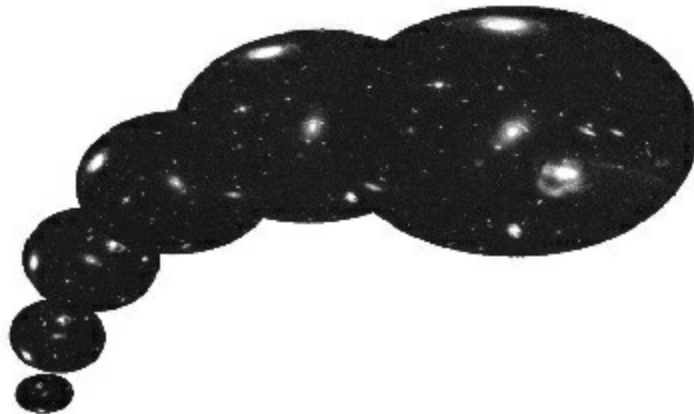
astrónomos de las nebulosas –nubecillas blanquecinas situadas entre las estrellas– demuestran que también la Galaxia es a su vez un grano de polvo en una inmensa nube de galaxias, cientos de miles de millones de ellas, que se extienden más allá de donde alcanza la visión de nuestros telescopios más potentes. El mundo se ha convertido ahora en una extensión uniforme e ilimitada. La figura que sigue no es un dibujo: es una fotografía tomada por el telescopio orbital Hubble, que muestra una imagen del cielo más profundo que alcanzamos a ver con el más potente de nuestros telescopios: a simple vista sería un minúsculo trocito de cielo negrísimo. En el telescopio, aparece como una superficie salpicada de galaxias lejanísimas. Cada punto negro de la imagen es una galaxia con cien mil millones de soles parecidos al nuestro. Desde hace unos pocos años hemos visto que la mayoría de estos soles tienen planetas alrededor. Existen, pues, en el universo millones de millones de millones de planetas como la Tierra. Y se mire en la dirección que se mire, esto es lo que aparece:



Pero esta inmensa uniformidad, a su vez, es sólo aparente. Como he ilustrado en la primera lección, el espacio no es plano, sino curvo. La propia trama del universo, salpicada de galaxias, hemos de imaginarla movida por ondas similares a las olas del mar, a veces tan agitadas como para crear esos portales que son los agujeros negros. Volvamos, pues, a las imágenes dibujadas, para representar este universo surcado de grandes ondas:



Y, por último, hoy sabemos que este cosmos inmenso, elástico y constelado de galaxias, ha crecido durante unos quince mil millones de años, tras emerger de una pequeña nube extremadamente caliente y densa. Para representar esta visión ya no hemos de dibujar el universo, sino toda la historia del universo. He aquí el esquema:



El universo nace como una bolita y luego explota hasta alcanzar sus actuales dimensiones cósmicas. Ésta es nuestra imagen actual del universo, a la mayor escala que conocemos.

¿Hay otro? ¿Hubo algo antes? Quizá sí. Hablaré de ello dentro de un par de lecciones. ¿Existen otros universos parecidos, o distintos? No lo sabemos.

LECCIÓN CUARTA

Partículas

Dentro del universo descrito en la lección anterior se mueven la luz y las cosas. La luz está constituida por fotones, las partículas luminosas intuidas por Einstein. Las cosas que vemos están hechas de átomos. Cada átomo es un núcleo rodeado de electrones. Cada núcleo está constituido por protones y neutrones, estrechamente empaquetados. Tanto los protones como los neutrones están hechos de partículas aún más pequeñas, que el físico estadounidense Murray Gell-Mann bautizó con el nombre de «quarks», inspirándose en una palabra sin sentido en una frase sin sentido –«Three quarks for Muster Mark!»– que aparece en el *Finnegans Wake* de James Joyce. Todas las cosas que tocamos están hechas, pues, de electrones y de estos quarks.

La fuerza que mantiene pegados a los quarks dentro de los protones y los neutrones la generan unas partículas que los físicos, con poco sentido del ridículo, denominan «gluones», del inglés *glue*, cola. En italiano se traduciría por *colloni*,² pero afortunadamente todos utilizan el término derivado del inglés.

Electrones, quarks, fotones y gluones son los componentes de todo lo que se mueve en el espacio que nos rodea. Son las «partículas elementales» que estudia la física de partículas. A estas partículas se añaden algunas otras, como, por ejemplo, los «neutrinos», que pululan por el universo pero apenas tienen interacciones con nosotros, y el «bosón de Higgs», detectado recientemente en Ginebra, en la gran máquina del CERN. Pero en total no son muchas: menos de una decena de tipos de partículas. Un puñado de ingredientes elementales que se comportan como las piezas de un gigantesco Lego con el que está construida toda la realidad material que nos rodea.

La forma en que estas partículas se mueven y su naturaleza las describe la mecánica cuántica. Estas partículas no son, pues, verdaderas piedrecillas; son más bien los «cuantos» de sus correspondientes campos elementales, así como los fotones son los «cuantos» del campo electromagnético. Son excitaciones elementales de un sustrato móvil parecido al campo de Faraday

y Maxwell. Son ondas minúsculas que se desplazan; que desaparecen y reaparecen según las extrañas reglas de la mecánica cuántica, donde lo que existe nunca es estable: es sólo un salto de una interacción a otra.

Aunque observemos una región vacía del espacio, donde no haya átomos, veremos igualmente el diminuto pulular de estas partículas. No existe un verdadero vacío, que esté vacío por completo. Al igual que el mar más calmado, visto de cerca, ondea ligeramente y palpita, así también los campos que forman el mundo fluctúan a pequeña escala, y podemos imaginar las partículas básicas del mundo continuamente creadas y destruidas por este palpar, viviendo vidas efímeras.

Éste es el mundo descrito por la mecánica cuántica y la teoría de las partículas. Lejanísimo ya del mundo mecánico de Newton y Laplace, donde unas minúsculas piedrecillas frías recorrían eternamente largas trayectorias precisas en un espacio geométrico inmutable. La mecánica cuántica y los experimentos con partículas nos han enseñado que el mundo es un constante e inquieto pulular de cosas, un continuo venir al mundo y desaparecer de entidades efímeras. Un conjunto de vibraciones, como el mundo de los hippies de los años sesenta. Un mundo de acontecimientos, no de cosas.

Los detalles de la teoría de las partículas se fueron construyendo poco a poco durante las décadas de 1950, 1960 y 1970. Participaron los grandes físicos de la época, como Feynman y GellMann, y entre ellos un nutrido grupo de italianos. El resultado de esta construcción es una intrincada teoría, basada en la mecánica cuántica, que lleva el poco glorioso nombre de «modelo estándar de las partículas elementales». El modelo estándar, puesto a punto en la década de 1970, se ha visto confirmado por una larga serie de experimentos que han verificado todas sus previsiones. Entre los primeros se cuentan las mediciones que en 1984 le valieron el Premio Nobel al físico y (actualmente) senador italiano Carlo Rubbia. La última confirmación vino con la revelación del bosón de Higgs en 2013.

Pero, pese a esa larga serie de éxitos experimentales, los físicos nunca se han tomado del todo en serio el modelo estándar. Es una teoría que, al menos a primera vista, tiene cierto tufillo a componenda y a batiburrillo. Está hecha de varias piezas y ecuaciones agrupadas sin un orden claramente definido: cierto número de campos (¿por qué precisamente éstos?) que interactúan entre sí con ciertas fuerzas (¿por qué precisamente éstas?), cada una de las cuales viene determinada por ciertas constantes (¿por qué precisamente esos

valores?) que respetan ciertas simetrías (¿por qué precisamente éstas?). Y está lejos de la liviana simplicidad de las ecuaciones de la relatividad general y la mecánica cuántica.

También la propia forma en que las ecuaciones del modelo estándar hacen previsiones sobre el mundo resulta absurdamente intrincada. Utilizadas directamente, dichas ecuaciones llevan a previsiones insensatas, donde cualquier cantidad calculada resulta ser infinitamente grande. Para conseguir resultados sensatos hay que imaginar que los parámetros que entran en ellas son a su vez infinitamente grandes, lo que permite contrarrestar los resultados absurdos y obtener otros razonables. Este procedimiento, intrincado y barroco, se conoce con el término técnico de «renormalización»; en la práctica funciona, pero deja un amargo sabor de boca para quien querría que la naturaleza fuera simple.

Durante los últimos años de su vida, Paul Dirac, el mayor científico del siglo XX después de Einstein, gran arquitecto de la mecánica cuántica y autor de la primera y principal ecuación del modelo estándar, expresó en repetidas ocasiones su descontento ante ese estado de cosas: «Todavía no hemos resuelto el problema», declaró.

El modelo estándar tiene también un llamativo defecto. Alrededor de cada una de las galaxias, los astrónomos observan los efectos de un gran halo de materia, que revela su existencia por la fuerza gravitatoria con la que atrae a las estrellas y desvía la luz. Pero, pese a observar sus efectos gravitatorios, no logramos ver directamente ese gran halo, y no sabemos de qué está formado. Se han examinado numerosas hipótesis al respecto, pero ninguna de ellas parece funcionar. Que hay algo parece actualmente evidente, pero no sabemos qué es. Hoy lo llamamos «materia oscura». Y parece que se trata precisamente de algo que el modelo estándar *no* describe, ya que, de lo contrario, lo veríamos. Algo que no son ni átomos, ni neutrinos, ni fotones...

No resulta sorprendente que haya más cosas en el Cielo y en la Tierra, querido lector, de cuantas sueña nuestra filosofía, y nuestra física. En realidad, hasta hace unos pocos años ni siquiera sospechábamos la existencia de las ondas de radio o de los neutrinos, que, sin embargo, llenan todo el universo.

El modelo estándar sigue siendo lo mejor que hoy somos capaces de decir sobre el mundo de las cosas, todas sus predicciones se han confirmado, y, aparte de la materia oscura –y de la gravedad, definida por la relatividad

general como una curvatura del espacio-tiempo—, describe bastante bien todos los aspectos del mundo que vemos. Se han propuesto teorías alternativas, pero los experimentos han acabado con ellas.

Así, por ejemplo, una bonita teoría propuesta en la década de 1960, denominada con el nombre técnico de SU(5), sustituía las disparejas ecuaciones del modelo estándar por una estructura bastante más hermosa y sencilla. La teoría preveía que el protón podía desintegrarse con cierta probabilidad, transformándose en partículas más ligeras. Se han construido grandes máquinas para ver desintegrarse a los protones. Varios físicos, algunos de ellos italianos, han dedicado su vida a tratar de observar un protón desintegrándose. (No se mira un solo protón cada vez, porque tarda demasiado tiempo en desintegrarse: se toman varias toneladas de agua y se colocan a su alrededor detectores sensibles de los productos de la desintegración.) Pero, ¡ay!, lo cierto es que jamás se ha visto desintegrarse un solo protón. La hermosa teoría SU(5), por muy elegante que sea, no debe de ser del agrado del buen Dios.

Actualmente se está repitiendo la historia con un grupo de teorías denominadas «supersimétricas», que predicen la existencia de una nueva clase de partículas. Durante toda mi vida de físico he oído a colegas que tenían la certeza de que iban a ver esas partículas al día siguiente. Han pasado días, meses, años, decenios, pero hasta ahora no han aparecido. La física no es siempre una historia de éxitos.

Nos quedamos con el modelo estándar. No será muy elegante, pero funciona la mar de bien, y describe el mundo que nos rodea. Y, quién sabe, bien mirado quizá no sea él el que no es elegante: tal vez seamos nosotros quienes todavía no hemos aprendido a verlo desde la perspectiva adecuada para comprender su simplicidad oculta. Por el momento, eso es lo que sabemos de la materia: un puñado de tipos de partículas elementales, que vibran y fluctúan de continuo entre el existir y el no existir, pululan en el espacio incluso cuando parece que no hay nada, se combinan entre sí hasta el infinito como las letras de un alfabeto cósmico para contar la inmensa historia de las galaxias, las innumerables estrellas, los rayos cósmicos, la luz del sol, las montañas, los bosques, los campos de grano, las risas de los niños en las fiestas, y el negro y estrellado cielo nocturno.

LECCIÓN QUINTA

Granos de espacio

Pese a su oscuridad, su falta de elegancia y las cuestiones que todavía permanecen abiertas, las teorías físicas de las que he hablado aquí describen el mundo mejor de cuanto se haya hecho nunca en el pasado. Deberíamos estar, pues, bastante satisfechos. Pero no lo estamos.

Se da una situación paradójica en el núcleo de nuestro conocimiento del mundo físico. El siglo xx nos ha dejado las dos joyas de las que ya he hablado: la relatividad general y la mecánica cuántica. Sobre la primera han crecido la cosmología, la astrofísica, el estudio de las ondas gravitatorias, de los agujeros negros y muchas otras cosas. La segunda se ha convertido en la base de la física atómica, la física nuclear, la física de las partículas elementales, la física de la materia condensada y muchas otras cosas. Dos teorías pródigas en dones y fundamentales para la tecnología actual, que han cambiado nuestra forma de vivir. Y, sin embargo, estas dos teorías no pueden ser ambas correctas, al menos en su forma actual, puesto que se contradicen mutuamente.

Un estudiante universitario que asista a las clases de relatividad general por la mañana y a las de mecánica cuántica por la tarde no podrá por menos que concluir que los profesores son unos necios, o que hace un siglo que no se hablan: están enseñándole dos imágenes del mundo en absoluta contradicción. Por la mañana, el mundo es un espacio curvo donde todo es continuo; por la tarde, el mundo es un espacio plano donde saltan cuantos de energía.

Lo paradójico es que ambas teorías funcionan extremadamente bien. La naturaleza se está comportando con nosotros como aquel anciano rabino al que acudieron dos hombres para dirimir una disputa. Tras escuchar al primero, el rabino le dice: «Tienes razón.» El segundo insiste en ser escuchado; el rabino así lo hace, y le dice: «Tú también tienes razón.» Entonces la mujer del rabino, que escuchaba desde otra habitación, le increpa: «¡Pero no pueden tener razón los dos!» El rabino reflexiona, asiente, y concluye: «También tú tienes razón.»

Un grupo de físicos teóricos repartidos por los cinco continentes está tratando laboriosamente de dirimir la cuestión. Su campo de estudio se denomina «gravedad cuántica»: el objetivo es encontrar una teoría, es decir, un conjunto de ecuaciones, pero sobre todo una visión del mundo coherente que resuelva esa esquizofrenia.

No es la primera vez que la física se encuentra ante dos teorías de gran éxito aparentemente contradictorias. El esfuerzo de síntesis a menudo se ha visto premiado en el pasado con grandes pasos adelante en la comprensión del mundo. Newton descubrió la gravitación universal combinando las parábolas de Galileo con las elipsis de Kepler. Maxwell dedujo las ecuaciones del electromagnetismo combinando las teorías eléctrica y magnética. Einstein llegó a la relatividad tratando de resolver un aparente conflicto entre electromagnetismo y mecánica. De modo que los físicos se sienten dichosos cuando encuentran un conflicto de este tipo entre dos teorías de éxito: se trata de una oportunidad extraordinaria. ¿Podemos construir una estructura conceptual para concebir el mundo que sea compatible con lo que hemos descubierto de éste por medio de *ambas* teorías?

Aquí, sobre el terreno, más allá de los límites del saber actual, la ciencia es aún más hermosa. En la fragua incandescente de las ideas que nacen, de las intuiciones, de las tentativas. De los caminos emprendidos y luego abandonados, de las ilusiones. En el esfuerzo de imaginar lo que no se ha imaginado todavía.

Hace veinte años la niebla era espesa; hoy existen pistas que suscitan entusiasmo y optimismo. Hay más de una, de manera que no se puede decir que el problema se haya resuelto. La multiplicidad engendra disensiones, pero el debate es saludable: en tanto la niebla no se haya dispersado, es bueno que haya críticas y opiniones opuestas. La principal dirección de investigación centrada en la tentativa de resolver el problema es la gravedad cuántica «de bucles», desarrollada en varios países del mundo por un nutrido grupo de investigadores, entre los que destacan muchos excelentes jóvenes italianos (todos ellos en universidades extranjeras).

La gravedad cuántica de bucles es un intento de combinar la relatividad general y la mecánica cuántica; una tentativa cauta, puesto que no utiliza ninguna otra hipótesis aparte de estas dos mismas teorías, oportunamente reformuladas para hacerlas compatibles. Pero sus consecuencias son radicales: una nueva modificación profunda de la estructura de la realidad.

La idea es sencilla. La relatividad general nos ha enseñado que el espacio no es una caja inerte, sino algo dinámico: una especie de inmenso molusco móvil en el que estamos inmersos, que se puede comprimir y doblar. La mecánica cuántica, por su parte, nos enseña que todo campo de tipo similar está «hecho de cuantos»: tiene una fina estructura granular. De ello se deduce inmediatamente que también el espacio físico está «hecho de cuantos».

La predicción central de la teoría de los bucles es, pues, que el espacio no es continuo, no es divisible hasta el infinito, sino que está formado por granos, esto es, por «átomos de espacio». Estos últimos son extremadamente minúsculos: cien mil millones de millones de veces más pequeños que el más pequeño de los núcleos atómicos. La teoría describe en forma matemática esos átomos de espacio y las ecuaciones que determinan su evolución. Se denominan «bucles», o «anillos», porque ninguno de ellos está aislado, sino «anillado» a otros similares, formando una red de relaciones que teje la trama del espacio.

¿Dónde están estos cuantos de espacio? En ningún sitio. No están *en* un espacio, porque el espacio son ellos mismos. El espacio se crea por la interacción de cuantos individuales de gravedad. Una vez más, el mundo parece ser relación, antes que objetos.

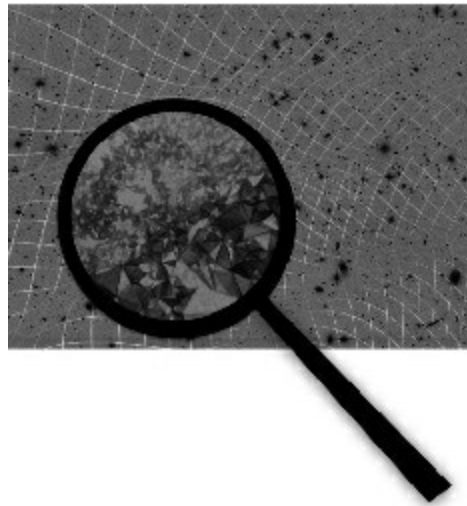
Pero es la segunda consecuencia de la teoría la que puede resultar más extrema. Al igual que desaparece la idea del espacio continuo que contiene las cosas, también lo hace la idea de un «tiempo» elemental y primitivo que discurre independientemente de las cosas. Las ecuaciones que describen granos de espacio y materia ya no contienen la variable «tiempo».

Eso no significa que todo esté inmóvil y no exista el cambio. Significa, por el contrario, que el cambio es ubicuo, pero los procesos elementales no pueden ordenarse en una sucesión corriente de instantes. A la pequeñísima escala de los cuantos de espacio, la danza de la naturaleza no se desarrolla al ritmo de la batuta de un solo director de orquesta, de un único tiempo: cada proceso danza independientemente de sus vecinos, siguiendo un ritmo propio. El discurrir del tiempo es inherente al mundo, nace en el mundo mismo, de las relaciones entre acontecimientos cuánticos que son el mundo y son ellos mismos el manantial del tiempo.

El mundo descrito por la teoría se aleja aún más de lo que nos resulta familiar. Ya no hay un espacio que «contiene» el mundo ni un tiempo «a lo largo del cual» ocurren los acontecimientos. Sólo hay procesos elementales

donde cuantos de espacio y materia interaccionan de continuo entre sí. La ilusión del espacio y el tiempo continuos a nuestro alrededor es la visión desenfocada de esta abundancia de procesos elementales. Igual que un sosegado y transparente lago alpino en realidad está formado por una rápida danza de miríadas de minúsculas moléculas de agua.

Vista desde muy cerca, a la luz de un cristal de aumento ultrapotente, la penúltima imagen de la tercera lección debería mostrar la estructura granular del espacio:



¿Podemos verificar esta teoría con experimentos? Lo estamos pensando, y lo estamos probando, pero todavía no hay verificaciones experimentales. Hay, sin embargo, muchas ideas.

Una de ellas consiste en estudiar los agujeros negros. Hoy vemos en el cielo los agujeros negros formados por las estrellas que han colapsado. La materia de estas estrellas se precipita hacia el interior, aplastada por su propio peso, y desaparece de nuestra vista. Pero ¿adónde va a parar?

Si la teoría de la gravedad cuántica de bucles es correcta, la materia no puede realmente colapsar en un punto infinitesimal. Porque no existen puntos infinitesimales: existen solamente regiones finitas de espacio. Al desmoronarse bajo su propio peso, la materia debe de haberse hecho cada vez más densa, hasta el punto de que la mecánica cuántica no ha generado una presión contraria capaz de contrarrestar el peso. Este hipotético estado final de la vida de una estrella, en el que la presión generada por las fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo equilibra el peso de la materia, es lo que se

conoce como «estrella de Planck». Si el Sol, al dejar de arder, formara un agujero negro, éste tendría un diámetro de cerca de un kilómetro y medio. En su interior seguiría precipitándose toda su materia, hasta convertirse en una estrella de Planck. Sus dimensiones serían entonces similares a las de un átomo: toda la materia del Sol concentrada en el espacio de un átomo. Ese estado extremo de la materia constituiría una estrella de Planck.

Una estrella de Planck no es estable: una vez comprimida al máximo, rebota y empieza a expandirse de nuevo, lo que lleva a la explosión del agujero negro. El proceso, visto por un observador hipotético sentado dentro del agujero negro, en la estrella de Planck, es rapidísimo: un efecto rebote. Pero el tiempo no transcurre a la misma velocidad para él que para quien está fuera del agujero negro, por la misma razón por la que en la montaña el tiempo transcurre más deprisa que en el mar. Sólo que aquí la diferencia del paso del tiempo es enorme, debido a las condiciones extremas, y lo que para el observador situado en la estrella es un breve rebote, visto desde fuera parece un tiempo larguísimo. Por eso vemos que los agujeros negros se mantienen iguales durante períodos de tiempo larguísimos: un agujero negro es una estrella que rebota vista a cámara extremadamente lenta.

Es posible que en el horno de los primeros instantes del universo se formaran agujeros negros, y algunos de ellos estén explotando ahora. De ser así, quizá podríamos detectar las señales que emiten al explotar, en forma de rayos cósmicos de alta energía que llegan del cielo, y, por lo tanto, observar y medir un efecto directo de un fenómeno de gravedad cuántica. La idea es osada, y podría no funcionar, por ejemplo porque podría ser que en el universo primigenio no se hubiesen formado suficientes agujeros negros para poder ver explotar a alguno actualmente. Pero la búsqueda de las señales se ha iniciado ya. Ya veremos.

Otra de las consecuencias de la teoría, y una de las más espectaculares, afecta al comienzo del universo. Sabemos reconstruir la historia de nuestro mundo hasta un período inicial en el que éste era minúsculo. Pero ¿y antes de eso? Pues bien, las ecuaciones de bucles nos permiten reconstruir la historia del universo remontándonos todavía más atrás.

Y lo que encontramos es que, cuando el universo está extremadamente comprimido, la teoría cuántica genera una fuerza de repulsión, con el resultado de que el Big Bang, la «gran explosión», podría haber sido en realidad un Big Bounce, un «gran rebote»: nuestro mundo podría haber

nacido de un universo anterior que estaba contrayéndose bajo su propio peso hasta apretarse en un espacio pequeñísimo, para luego «rebotar» y empezar a expandirse de nuevo, convirtiéndose en el universo en expansión que hoy observamos a nuestro alrededor. El momento del rebote, cuando el universo está comprimido en una cáscara de nuez, es el verdadero reino de la gravedad cuántica: espacio y tiempo han desaparecido por completo; el mundo está disuelto en una abarrotada nube de probabilidades que, sin embargo, las ecuaciones todavía no son capaces de describir. Y la última imagen de la tercera lección se transforma en:



Nuestro universo puede haber nacido del rebote de una fase anterior, tras pasar por una fase intermedia sin espacio ni tiempo.

La física abre una ventana para mirar a lo lejos. Y lo que vemos no hace sino causarnos asombro. Nos damos cuenta de que estamos llenos de prejuicios y nuestra imagen intuitiva del mundo es parcial, provinciana e inadecuada. El mundo no deja de cambiar ante nuestros ojos a medida que lo vemos mejor.

La Tierra no es plana, no está inmóvil. Si probamos a juntar cuanto hemos aprendido sobre el mundo físico en el siglo XX, todos los indicios apuntan a algo profundamente distinto de nuestras ideas instintivas sobre la materia, el espacio y el tiempo. La gravedad cuántica de bucles constituye una tentativa de descifrar esos indicios y poder mirar un poco más lejos.

LECCIÓN SEXTA

La probabilidad, el tiempo y el calor de los agujeros negros

Junto a las grandes teorías que describen los componentes elementales del mundo, de las que he hablado hasta ahora, existe en la física otro gran pilar, algo distinto de los otros. La pregunta de la que surgió inesperadamente es: «¿Qué es el calor?»

Hasta mediados del siglo XIX, los físicos intentaban comprender el calor pensando que se trataba de una especie de fluido, el «calórico», o bien dos fluidos, uno caliente y otro frío; pero la idea se reveló errónea. Luego Maxwell y Boltzmann lo entendieron. Y lo que entendieron es algo muy hermoso, extraño y profundo, que nos lleva a terrenos todavía hoy inexplorados.

Lo que ellos comprendieron es que una sustancia caliente no es una sustancia que contiene fluido calórico: es una sustancia cuyos átomos se mueven más deprisa. Los átomos y las moléculas –grupitos de átomos unidos– se mueven constantemente: corren, vibran, rebotan, etcétera. El aire frío es aire cuyos átomos, o, mejor dicho, cuyas moléculas, se mueven más despacio; el aire caliente es aire cuyas moléculas se mueven más deprisa. Simple y hermoso. Pero la cosa no termina aquí.

El calor, como sabemos, va siempre de los objetos calientes a los fríos. Una cucharilla fría dentro de una taza de té caliente se calienta también. En un día helado, si no nos tapamos bien perdemos rápidamente calor y nos enfriamos.

¿Por qué el calor va de los objetos calientes a los fríos, y no al revés?

Se trata de una pregunta crucial, puesto que afecta a la naturaleza del tiempo. En efecto, en todos los casos en los que no se intercambia calor, o bien cuando el calor intercambiado es insignificante, vemos que el futuro se comporta exactamente como el pasado. Por ejemplo, para el movimiento de los planetas del sistema solar el calor es casi irrelevante, y, de hecho, ese mismo movimiento podría producirse igualmente al revés sin que se violara ninguna ley física. En cambio, apenas hay calor, el futuro es distinto del pasado. Por ejemplo, mientras no haya fricción, un péndulo sigue oscilando

indefinidamente. Si lo filmamos y proyectamos la película al revés, veremos un movimiento del todo posible. Pero si hay fricción, ésta hace que el péndulo caliente un poco sus soportes, pierda energía y se ralentice. La fricción produce calor. Y de repente nos encontramos con que podemos distinguir el futuro (hacia el que el péndulo se ralentiza) del pasado: en efecto, no se ha visto nunca un péndulo que parta de una posición inmóvil y empiece a oscilar con la energía obtenida absorbiendo calor de sus soportes.

La diferencia entre pasado y futuro sólo existe cuando hay calor. El fenómeno fundamental que distingue el futuro del pasado es el hecho de que el calor va de los objetos más calientes a los más fríos.

Pero ¿por qué el calor va de los objetos calientes a los fríos, y no al revés?

La razón la encontró el físico austriaco Ludwig Boltzmann, y resulta sorprendentemente simple: es el azar. La idea de Boltzmann es sutil, y pone en juego el concepto de probabilidad. El calor no va de los objetos calientes a los fríos obligado por una ley absoluta: va sólo con una gran probabilidad. El motivo es que estadísticamente resulta más probable que un átomo de la sustancia caliente, que se mueve deprisa, colisione contra un átomo frío y le transmita un poco de su energía, que lo contrario. La energía se conserva en las colisiones, pero tiende a repartirse en partes más o menos iguales cuando se producen muchas colisiones al azar. De ese modo las temperaturas de los objetos en contacto tienden a igualarse. No es imposible que un cuerpo caliente se caliente aún más al ponerse en contacto con un cuerpo frío: es sólo extremadamente improbable.

Este hecho de llevar la *probabilidad* al centro de las consideraciones físicas y utilizarla nada menos que para explicar las bases de la dinámica del calor se consideró absurdo en un primer momento. Como ocurre a menudo, nadie tomó en serio a Boltzmann, y éste acabó por suicidarse, ahorcándose el 5 de septiembre de 1906 en Duino, cerca de Trieste, sin llegar a ser testigo del reconocimiento universal de la veracidad de sus ideas.

Pero ¿cómo entra la probabilidad en el corazón de la física? En la segunda lección le he explicado al lector que la mecánica cuántica predice que el movimiento de cualquier cosa diminuta obedece al azar. Éste pone en juego la probabilidad. Pero la probabilidad a la que se refería Boltzmann, la probabilidad vinculada al calor, tiene un origen distinto y es independiente de la mecánica cuántica. La probabilidad que actúa en la ciencia del calor está ligada en cierto sentido a nuestra *ignorancia*. Yo puedo no saber algo de

forma absoluta, pero asignarle una probabilidad mayor o menor. Por ejemplo, no sé si mañana lloverá, hará sol o nevará en Marsella, pero la probabilidad de que mañana nieve en Marsella, en agosto, es baja. También en el caso de la mayoría de los objetos físicos sabemos algo de su estado, pero no todo, y sólo podemos hacer previsiones probabilísticas. Pensemos en un globo lleno de aire. Puedo medirlo, medir su forma, su volumen, su presión, su temperatura... Pero las moléculas de aire del globo están desplazándose rápidamente en su interior, y yo no conozco la posición exacta de cada una de ellas. Eso me impide predecir con exactitud cómo se comportará el globo. Si, por ejemplo, desato el nudo que lo mantiene cerrado y lo suelto, se desinflará ruidosamente moviéndose y golpeándose de un lado a otro de un modo para mí imprevisible. Imprevisible para mí, que sólo conozco la forma, el volumen, la presión y la temperatura del globo. El zarandearse de aquí para allá del globo depende del detalle de la posición de las moléculas en su interior, que yo desconozco.

Aunque no puedo predecirlo todo con exactitud, sí puedo predecir la probabilidad de que ocurra una cosa u otra. Será muy improbable, por ejemplo, que el globo salga por la ventana, gire alrededor de la farola que hay allí abajo al fondo, y luego vuelva al punto de partida posándose sobre mi mano. Algunos comportamientos son más probables, y otros más improbables. La probabilidad de que en las colisiones de las moléculas el calor pase del cuerpo más caliente al más frío se puede calcular, y resulta ser muchísimo mayor que la probabilidad de que el calor vuelva atrás.

La parte de la física que aclara estas cosas es la física estadística, y uno de sus triunfos, a partir de Boltzmann, ha sido el de comprender el origen probabilístico del comportamiento del calor y de la temperatura, esto es, la termodinámica.

A primera vista, la idea de que nuestra *ignorancia* tenga implicaciones con respecto al comportamiento del mundo parece irrazonable: la cucharilla fría se calienta en el té caliente, y el globo revolotea cuando se suelta, independientemente de lo que yo sepa o deje de saber. ¿Qué tiene que ver lo que sabemos o no sabemos con las leyes que gobiernan el mundo? La pregunta es legítima, y la respuesta, sutil. La cucharilla y el globo se comportan como deben, siguiendo las leyes de la física, de manera completamente independiente de lo que nosotros sepamos o no sepamos de ellos. La previsibilidad o imprevisibilidad de su comportamiento no afectan a

su estado exacto; afectan a la limitada clase de sus propiedades con la que nosotros interactuamos. *Esta* clase de propiedades depende de *nuestra* forma concreta de interactuar con la cucharilla y el globo. En consecuencia, la probabilidad no afecta a la evolución de los cuerpos en sí, sino a la evolución de los valores de determinadas subclases de propiedades de los cuerpos cuando éstas interactúan con otros cuerpos. Una vez más, se revela la naturaleza profundamente relacional de los conceptos que utilizamos para poner orden en el mundo.

La cucharilla fría se calienta en el té caliente porque té y cucharilla interactúan con nosotros sólo a través de un pequeño número de variables entre las innumerables que caracterizan su microestado (como, por ejemplo, la temperatura). El valor de *estas* variables no es suficiente para predecir su comportamiento futuro exacto (como en el caso del globo), pero sí lo es para estimar que existe una óptima probabilidad de que la cucharilla se caliente.

Espero no haber perdido la atención del lector en este sutil pasaje.

A lo largo del siglo *xx*, la termodinámica –esto es, la ciencia del calor– y la mecánica estadística –esto es, la ciencia de la probabilidad de los diversos movimientos– han pasado a aplicarse también a los campos electromagnéticos y a los fenómenos cuánticos.

Su aplicación al campo gravitatorio, en cambio, se ha revelado más peliaguda. Cómo se comporta el campo gravitatorio cuando se difunde calor en él es una cuestión aún no resuelta. Sabemos qué le pasa a un campo electromagnético caliente: en un horno, por ejemplo, hay radiación electromagnética caliente que sabemos describir. Las ondas electromagnéticas vibran al azar repartiéndose la energía, y podemos imaginar el conjunto como un gas hecho de fotones que se mueven como las moléculas en el globo caliente. Pero ¿qué es un campo gravitatorio caliente? Como hemos visto en la primera lección, el campo gravitatorio es el propio espacio, o, mejor dicho, el espacio-tiempo; de manera que cuando se difunde calor en el campo gravitatorio, los que vibren han de ser los propios espacio y tiempo..., pero eso es algo que todavía no sabemos definir bien: no disponemos de ecuaciones que describan la vibración térmica de un espacio-tiempo caliente.

Tales cuestiones nos llevan al corazón del problema del tiempo: ¿qué es, entonces, el fluir del tiempo?

El problema nace ya en la física clásica y será recalado por los filósofos

entre los siglos XIX y XX, pero se hará mucho más acusado en la física moderna. La física describe el mundo por medio de fórmulas que dicen cómo varían las cosas en función de la «variable tiempo». Pero también podemos escribir fórmulas que nos digan cómo varían las cosas en función de la «variable posición», o cómo varía el sabor de un risotto en función de la «variable cantidad de mantequilla». El tiempo parece «discurrir», mientras que la cantidad de mantequilla o la posición en el espacio no «discurren». ¿De dónde viene la diferencia?

Otra forma de plantear el problema es preguntarse qué es el «presente». Decimos que las cosas que existen son las del presente: el pasado (ya) no existe, y el futuro (todavía) no existe. Pero no hay nada en la física que corresponda a la noción de «ahora». Comparemos «ahora» con «aquí». «Aquí» designa el lugar donde se encuentra quien habla: para dos personas diferentes, «aquí» indica dos lugares distintos. Por lo tanto, «aquí» es una palabra cuyo significado depende de dónde se pronuncie (el término técnico que define a este tipo de palabras es el de *deíctico*). También «ahora» designa el instante en que la palabra se pronuncia («ahora» es asimismo un término deíctico). A nadie se le ocurriría decir que las cosas de «aquí» existen, mientras que las cosas que no están «aquí» no existen. Pero, entonces, ¿por qué decimos que las cosas que son «ahora» existen y las demás no? ¿Es el presente algo objetivo en el mundo, que «discurre» y hace «existir» las cosas una tras otra, o bien es meramente subjetivo, como «aquí»?

La cuestión puede parecer extravagante. Pero la física moderna ha hecho de ella un tema candente, puesto que la relatividad restringida ha mostrado que el concepto de «presente» es, también él, subjetivo. Físicos y filósofos han llegado a la conclusión de que la idea de un presente común a todo el universo es una ilusión, y el «discurrir» universal del tiempo, una generalización que no funciona. Cuando muere su gran amigo italiano Michele Besso, Albert Einstein escribe en una conmovedora carta a la hermana de éste: «Michele ha partido de este extraño mundo, un poco antes que yo. Eso no significa nada. Las personas como nosotros, que creen en la física, saben que la distinción entre pasado, presente y futuro no es otra cosa que una persistente y tozuda ilusión.»

Pero, sea ilusión o no, ¿qué explica el hecho de que para nosotros el tiempo «discurra», «pase», «fluya»? El discurrir del tiempo es patente para cada uno de nosotros: nuestros pensamientos y nuestra habla existen en el

tiempo, la propia estructura de nuestro lenguaje requiere del tiempo (una cosa «es», o «fue», o «será»). Podemos imaginar un mundo sin colores, sin materia, incluso sin espacio, pero es difícil imaginarlo sin tiempo. El filósofo alemán Martin Heidegger hizo hincapié en este nuestro «habitar el tiempo». ¿Es posible que el fluir del tiempo que Heidegger plantea como primitivo se halle ausente de la descripción del mundo?

Algunos filósofos, entre ellos los heideggerianos más devotos, concluyen que la física no es capaz de describir los aspectos más fundamentales de lo real, y la descalifican como una forma de conocimiento que genera confusión. Pero demasiadas veces en el pasado nos hemos dado cuenta de que son nuestras intuiciones inmediatas las que resultan imprecisas: de habernos atendido a ellas, todavía seguiríamos pensando que la Tierra es plana y el Sol gira a su alrededor. Las intuiciones se han desarrollado sobre la base de nuestra limitada experiencia. Cuando miramos un poco más allá descubrimos que el mundo no es como nos parece: la Tierra es redonda, y en Ciudad del Cabo tienen los pies arriba y la cabeza abajo. Confiar en las intuiciones inmediatas, más que en los resultados de una evaluación colectiva racional, atenta e inteligente, no es sabiduría: es la presunción del anciano que se niega a creer que el gran mundo de fuera del pueblecito donde vive puede ser distinto de lo que él ha visto siempre.

Pero, entonces, ¿de dónde surge la vívida experiencia del discurrir del tiempo?

La indicación para responder proviene del estrecho vínculo entre el tiempo y el calor –sólo cuando hay flujo de calor el pasado y el futuro son distintos–, y del hecho de que en física el calor está ligado a las probabilidades, y éstas, a su vez, al hecho de que nuestras interacciones con el resto del mundo no distinguen los detalles finos de la realidad.

El fluir del tiempo emerge de la física, es cierto, pero no en el ámbito de la descripción exacta del estado de las cosas; emerge más bien en el ámbito de la estadística y de la termodinámica. Ésta podría ser la clave del misterio del tiempo. El «presente» no existe de manera objetiva más de lo que pueda existir un «aquí» objetivo, pero las interacciones microscópicas del mundo hacen surgir fenómenos temporales para un sistema (como, por ejemplo, nosotros mismos) que interactúa sólo con medias de miríadas de variables. Nuestra memoria y la conciencia se construyen sobre estos fenómenos estadísticos, que no son invariantes en el tiempo. Para una hipotética vista

extremadamente aguda que lo viera todo no habría tiempo «que discurre», y el universo sería un bloque de pasado, presente y futuro. Pero nosotros, seres conscientes, habitamos el tiempo porque sólo vemos una pálida imagen del mundo. Si se me permite robarle las palabras a mi editor: «Lo no manifiesto es mucho más vasto que lo manifiesto.» De este desenfoque del mundo nace nuestra percepción del discurrir del tiempo.

¿Está claro? No. Queda muchísimo por entender. Una pista para abordar el problema viene de un cálculo realizado por el físico inglés Stephen Hawking, célebre por haber logrado seguir haciendo física de calidad pese a los graves problemas de salud que lo tienen clavado a una silla de ruedas y le impiden hablar.

Utilizando la mecánica cuántica, Hawking ha conseguido mostrar que los agujeros negros siempre están «calientes». Emiten calor como una estufa. Es el primer indicio concreto de qué es un «espacio caliente». Nadie ha observado nunca este calor porque es muy débil en los agujeros negros reales que vemos en el cielo; pero el cálculo de Hawking resulta convincente, se ha repetido de muy diversas formas, y en general el calor de los agujeros negros se considera real.

Ahora bien, este calor de los agujeros negros es un efecto cuántico sobre un objeto, el agujero negro, que es de naturaleza gravitatoria. Son los cuantos individuales de espacio, los granos elementales de espacio, las «moléculas» que al vibrar calientan la superficie de los agujeros negros y generan el calor propio de éstos. Pero este fenómeno involucra a la vez la mecánica estadística, la relatividad general y la ciencia del calor. Si bien quizá estamos empezando a entender algo sobre la gravedad cuántica, que combina dos de las tres piezas del puzzle, en cambio no tenemos aún ni la más mínima teoría capaz de aunar las tres piezas de nuestro saber fundamental sobre el mundo, y todavía no entendemos bien por qué sucede este fenómeno.

El calor de los agujeros negros es una piedra de Rosetta, escrita a caballo entre tres lenguas –cuantos, gravedad y termodinámica–, que espera a ser descifrada para decirnos qué es de verdad el discurrir del tiempo.

PARA TERMINAR: NOSOTROS

Después de haber ido tan lejos, desde la estructura profunda del espacio hasta el límite del cosmos que conocemos, quisiera volver, antes de concluir esta serie de lecciones, a nosotros mismos.

¿Qué lugar ocupamos nosotros, seres humanos que perciben, deciden, ríen y lloran, en este gran fresco del mundo que ofrece la física contemporánea? Si el mundo es un pulular de efímeros cuantos de espacio y de materia, un inmenso juego de construcción de espacio y partículas elementales, ¿qué somos nosotros? ¿También estamos hechos sólo de cuantos y de partículas? Pero, entonces, ¿de dónde viene esa sensación de existir de manera singular y en primera persona que experimenta cada uno de nosotros? Entonces, ¿qué son nuestros valores, nuestros sueños, nuestras emociones, nuestro propio saber? ¿Qué somos nosotros, en este mundo inmenso y rutilante?

No puedo pensar siquiera en tratar de responder en serio a tal pregunta en estas sencillas páginas. Se trata de una pregunta difícil. En el gran cuadro de la ciencia contemporánea hay muchas cosas que no entendemos, y una de las que entendemos menos somos nosotros mismos. Pero evitar esta pregunta como quien no quiere la cosa implicaría, creo, pasar por alto algo esencial. Me he propuesto explicar cómo aparece el mundo a la luz de la ciencia, y en el mundo también estamos nosotros.

«Nosotros», seres humanos, somos ante todo el sujeto que observa este mundo, los autores, colectivamente, de esta fotografía de la realidad que aquí he intentado componer. Somos nodos de una red de intercambios, de la que este libro es una pieza, en la que nos pasamos unos a otros imágenes, instrumentos, información y conocimiento. Pero también somos parte integrante del mundo que vemos; no somos observadores externos: estamos situados en él. Nuestra perspectiva de él es interna. Estamos hechos de los mismos átomos y de las mismas señales de luz que se intercambian los pinos en las montañas y las estrellas en las galaxias.

A medida que ha ido aumentando nuestro conocimiento, nos hemos ido haciendo cada vez más conscientes del hecho de que formamos parte, y una parte pequeña, del universo. Eso es algo que aconteció ya en los siglos

pasados, pero que se ha producido de manera creciente en el último siglo. Creíamos estar en un planeta en el centro del cosmos, y no lo estamos. Creíamos ser una raza aparte en la familia de los animales y de las plantas, y hemos descubierto que descendemos de los mismos padres que todos los demás seres vivos que nos rodean. Tenemos bisabuelos comunes con las mariposas y los alerces. Somos como un hijo único que crece y descubre que el mundo no gira sólo a su alrededor como creía de pequeño: tiene que aceptar ser uno más. Reflejándonos en los demás y en las otras cosas, descubrimos quiénes somos.

Durante la época del gran idealismo alemán, Schelling pudo pensar que el hombre representaba la cumbre de la naturaleza, el punto sublime donde la realidad toma conciencia de sí misma. Hoy, desde la perspectiva de nuestro saber sobre el mundo natural, esa idea nos hace sonreír. Si somos especiales, lo somos del modo en que lo es cada uno para sí mismo, o cada madre para su hijo. Pero, desde luego, no para el resto de la naturaleza. En el mar inmenso de galaxias y estrellas, somos un apartado rincón infinitesimal; entre los infinitos arabescos de formas que componen lo real, nosotros no somos más que un garabato entre muchos.

Las imágenes que nos construimos del universo viven en nuestro interior, en el espacio de nuestros pensamientos. Entre esas imágenes –entre lo que logramos reconstruir y comprender con nuestros limitados medios– y la realidad de la que formamos parte, existen innumerables filtros: nuestra ignorancia, la limitación de nuestros sentidos y nuestra inteligencia, o las propias condiciones que nuestra naturaleza de sujetos, y sujetos concretos, impone a la experiencia. Sin embargo, dichas condiciones no son universales como imaginara Kant, deduciendo de ello, obviamente sin razón, que la naturaleza euclidiana del espacio e incluso la mecánica newtoniana habían de ser verdaderas a priori. Lo son a posteriori de la evolución mental de nuestra especie, y están en constante evolución. No sólo aprendemos, sino que aprendemos también a cambiar gradualmente nuestra estructura conceptual y a adaptarla a lo que aprendemos. Y lo que aprendemos a conocer, aunque lentamente y a tientas, es el mundo real del que formamos parte. Las imágenes que nos construimos del universo viven en nuestro interior, en el espacio de nuestros pensamientos, pero describen más o menos bien el mundo real del que formamos parte. Seguimos huellas para describir mejor este mundo.

Cuando hablamos del Big Bang o de la estructura del espacio, lo que hacemos no es una continuación de los relatos libres y fantásticos que los hombres se han contado por las noches alrededor del fuego durante centenares de milenios. Es la continuación de algo distinto: de la mirada de esos mismos hombres, a las primeras luces del alba, buscando entre el polvo de la sabana las huellas de un antílope; escudriñando los detalles de la realidad para deducir aquello que no vemos directamente, pero cuyas huellas podemos seguir. Conscientes de que siempre podemos equivocarnos, y, por lo tanto, dispuestos en todo momento a cambiar de idea si aparece una nueva huella, pero sabiendo también que si somos valientes lo entenderemos bien y encontraremos lo que buscamos. Eso es la ciencia.

La confusión entre estas dos actividades humanas distintas, inventar relatos y seguir huellas para encontrar algo, es el origen de la incompreensión y la desconfianza hacia la ciencia de una parte de la cultura contemporánea. La diferencia es sutil: el antílope cazado al amanecer no está muy lejos del dios antílope de los relatos de la noche. Es una lábil frontera: los mitos se nutren de la ciencia y la ciencia se nutre de los mitos. Pero el valor cognoscitivo del saber permanece. Si encontramos al antílope, podremos comer.

Nuestro saber refleja, pues, el mundo. Lo hace más o menos bien, pero representa el mundo que habitamos.

Esta comunicación entre nosotros y el mundo no es algo que nos diferencie del resto de la naturaleza. Las cosas del mundo interactúan de continuo unas con otras, y al hacerlo el estado de cada una de ellas lleva la huella del estado de aquellas otras con las que ha interactuado: en ese sentido, están constantemente intercambiando información unas con otras.

La información que un sistema físico tiene sobre otro sistema no tiene nada de mental o de subjetivo: es sólo el vínculo que la física determina entre el estado de algo y el estado de alguna otra cosa. Una gota de lluvia contiene información sobre la presencia de una nube en el cielo; un rayo de luz contiene información sobre el color de la sustancia de la que proviene; un reloj tiene información sobre la hora del día; el viento transmite información sobre una tormenta cercana; un virus del resfriado tiene información sobre la vulnerabilidad de mi nariz; el ADN de nuestras células contiene toda la información sobre nuestro código genético, que hace que me parezca a mi padre, y mi cerebro bulle de información acumulada durante mi experiencia.

La materia prima de nuestros pensamientos está constituida por una riquísima información recogida, intercambiada, acumulada y constantemente elaborada.

Pero también el termostato de mi instalación de calefacción «siente» y «conoce» la temperatura de mi casa, y, por lo tanto, tiene información sobre ella, y apaga la calefacción cuando hace suficiente calor. ¿Cuál es la diferencia entre el termostato y yo, que «siento» y «sé» que hace calor, decido libremente si encender o no la calefacción, y sé que existo? ¿Cómo puede el constante intercambio de información en la naturaleza producirnos a nosotros mismos y producir nuestros pensamientos?

El problema sigue abierto de par en par, y las posibles soluciones sobre las que se discute actualmente son tan numerosas como bellas. Ésta, creo yo, es una de las fronteras más interesantes de la ciencia, donde están a punto de producirse grandes progresos. Hoy, nuevos instrumentos nos permiten observar la actividad cerebral en acción, y cartografiar las intrincadas redes del cerebro con impresionante precisión. En 2014 se realizó la primera cartografía completa de la estructura cerebral fina («mesoscópica») de un mamífero. Asimismo, no sólo los filósofos sino también los neurocientíficos están discutiendo ideas precisas sobre la forma matemática de las estructuras que pueden corresponder a la sensación subjetiva de la conciencia.

Una de las teorías más hermosas, en mi opinión, es la desarrollada por un brillante científico italiano que trabaja en Estados Unidos, Giulio Tononi. Se llama «teoría de la información integrada», y es un intento de definir de manera cuantitativa la estructura que debe tener un sistema para ser consciente; un modo, por ejemplo, de diferenciar qué cambia realmente en el mundo físico cuando estamos despiertos (conscientes) y cuando estamos dormidos sin soñar (no conscientes). Es, desde luego, una tentativa. No disponemos todavía de una solución convincente y consensuada a la pregunta de cómo se forma la conciencia de nosotros mismos, pero me da la impresión de que la niebla está empezando a disiparse.

Hay una cuestión en particular, con respecto a nosotros mismos, que a menudo nos deja perplejos: ¿qué significa que seamos libres de tomar decisiones si nuestro comportamiento no hace sino seguir las leyes de la naturaleza? ¿Acaso no hay contradicción entre nuestra sensación de libertad y el rigor con el que ahora hemos comprendido que se desarrollan las cosas del mundo? ¿Acaso hay algo en nosotros que escapa a las regularidades de la

naturaleza y nos permite apartarnos de ellas y eludirlas con nuestro libre pensamiento?

No, no hay nada en nosotros que escape a las regularidades de la naturaleza. Si algo en nosotros violara dichas regularidades, ya lo habríamos descubierto hace tiempo. No hay nada en nosotros que viole el comportamiento natural de las cosas. Toda la ciencia moderna, de la física a la química, de la biología a las neurociencias, no hace sino reforzar esta observación.

La solución a la confusión es otra; cuando decimos que somos libres, y es cierto que podemos serlo, eso significa que nuestros comportamientos vienen determinados por lo que sucede en nuestro propio interior, en el cerebro, y no se ven constreñidos por el exterior. Ser libres no significa que nuestros comportamientos no estén determinados por las leyes de la naturaleza: significa que vienen determinados por las leyes de la naturaleza que actúan en nuestro cerebro. Nuestras decisiones libres están libremente determinadas por los resultados de interacciones fugaces y riquísimas entre los miles de millones de neuronas de nuestro cerebro: son libres cuando es la interacción de estas neuronas la que las determina.

¿Significa eso que, cuando decido, soy «yo» quien decide? Sí, por supuesto, porque sería absurdo preguntarse si «yo» puedo hacer algo distinto de lo que decide hacer el conjunto de mis neuronas: como supo comprender con maravillosa lucidez el filósofo holandés Baruch Spinoza en el siglo XVII, ambos son lo mismo. No hay un «yo» y «las neuronas de mi cerebro»: se trata de una misma cosa. Un individuo es un proceso, complejo, pero estrechamente integrado.

Cuando decimos que el comportamiento humano es imprevisible, decimos la verdad, puesto que es demasiado complejo para poderlo prever, sobre todo por nosotros mismos. Nuestra intensa sensación de libertad interior, como Spinoza supo ver sagazmente, viene del hecho de que la idea y las imágenes que tenemos de nosotros mismos son extremadamente más toscas y desvaídas que el detalle de la complejidad de lo que ocurre en nuestro interior. Somos una fuente de asombro para nosotros mismos. Tenemos cien mil millones de neuronas en nuestro cerebro, tantas como las estrellas de una galaxia, y un número todavía más astronómico de uniones y combinaciones en las que éstas pueden encontrarse. De todo eso no somos conscientes. «Nosotros»

somos el proceso formado por esta complejidad, no ese poco del que somos conscientes.

Ese «yo» que decide es el mismo «yo» que se forma –de un modo que, ciertamente, todavía no está del todo claro, pero que empezamos a entrever– reflejándose a sí mismo, autorrepresentándose en el mundo, reconociéndose como punto de vista variable situado en el mundo, a partir de esa impresionante estructura que gestiona información y construye representaciones que es nuestro cerebro.

Cuando tenemos la sensación de que «soy yo» quien decide, nada puede ser más correcto: ¿quién si no? Yo, como quería Spinoza, soy mi cuerpo y cuanto sucede en mi cerebro y en mi corazón, con su inmensa y para mí mismo inextricable complejidad.

La imagen científica del mundo, que he explicado en estas páginas, no está, pues, en contradicción con nuestro modo de sentirnos a nosotros mismos. No está en contradicción con nuestro modo de pensar en términos morales, psicológicos, con nuestras emociones y sentimientos. El mundo es complejo, y nosotros lo captamos con distintos lenguajes, apropiados para los diversos procesos que lo componen. Cada proceso complejo puede afrontarse y comprenderse con lenguajes diferentes a niveles diferentes. Los diversos lenguajes se entrecruzan, entrelazan y enriquecen mutuamente, como los propios procesos. El estudio de nuestra psicología se perfecciona comprendiendo la bioquímica de nuestro cerebro. El estudio de la física teórica se nutre de la pasión y de las emociones que conducen nuestra vida.

Nuestros valores morales, nuestras emociones, nuestros amores, no son menos verdaderos por el hecho de formar parte de la naturaleza, de ser compartidos con el mundo animal, o por haberse desarrollado y venir determinados por los millones de años de evolución de nuestra especie. Antes bien, son, por ello mismo, más verdaderos; son reales. Son la compleja realidad de la que estamos hechos. Nuestra realidad es el llanto y la risa, la gratitud y el altruismo, la fidelidad y las traiciones, el pasado que nos acosa y la serenidad. Nuestra realidad está constituida por nuestras sociedades, por la emoción de la música, por las ricas redes entrelazadas de nuestro saber común, que hemos construido juntos. Todo ello forma parte de esa misma naturaleza que describimos. Somos parte integrante de la naturaleza, somos naturaleza, en una de sus innumerables y variadísimas expresiones. Eso es lo que nos enseña nuestro creciente conocimiento de las cosas del mundo.

Lo específicamente humano no representa nuestra separación de la naturaleza, es nuestra naturaleza. Es una forma que ha adoptado la naturaleza aquí en nuestro planeta, en el juego infinito de sus combinaciones, de su mutuo influenciarse e intercambiarse correlaciones e información entre sus partes. Quién sabe cuántas y qué otras extraordinarias complejidades, en formas quizá absolutamente imposibles de imaginar por nosotros, existen en la inmensidad del cosmos... Habiendo tanto espacio allá arriba, resulta pueril pensar que en este rincón periférico de una galaxia de las más banales hay algo especial. La vida en la Tierra no es más que una muestra de lo que puede suceder en el universo. Y nuestra alma no es más que otra.

Somos una especie curiosa, la única que queda de un grupo de ellas (el «género *Homo*») constituido por al menos una docena de especies curiosas. Las otras especies del grupo se han extinguido ya; algunas, como los neandertales, hace poco: no han pasado ni treinta mil años. Se trata de un grupo de especies evolucionadas en África, afín a los jerárquicos y pendencieros chimpancés, pero todavía más a los bonobos, unos pequeños chimpancés pacíficos, alegremente promiscuos e igualitarios. Un grupo de especies que en repetidas ocasiones salió de África para explorar mundos nuevos, y que ha llegado lejos, hasta la Patagonia, hasta la Luna. No somos curiosos contra natura: somos curiosos por naturaleza.

Hace cien mil años que nuestra especie partió de África, quizá movida precisamente por esa curiosidad, aprendiendo a mirar cada vez más lejos. Sobrevolando África de noche me he preguntado si uno de aquellos lejanos antepasados nuestros, irguiéndose y poniéndose en camino hacia los abiertos espacios del norte, y mirando al cielo, habría podido imaginar a un lejano nieto suyo volando por aquel mismo cielo, preguntándose por la naturaleza de las cosas, movido todavía por su misma curiosidad.

Creo que nuestra especie no durará mucho. No parece tener la madera de las tortugas, que han seguido existiendo iguales a sí mismas durante cientos de millones de años, cientos de veces más de lo que llevamos existiendo nosotros. Pertenecemos a un género de especies de vida breve. Nuestros primos se han extinguido ya todos. Y nosotros causamos daños. Los cambios climáticos y medioambientales que hemos provocado han sido brutales, y difícilmente nos perdonarán. Para la Tierra será un pequeño parpadeo irrelevante, pero no creo que nosotros salgamos indemnes; tanto más cuanto que la opinión pública y la política prefieren ignorar los peligros que estamos

corriendo y esconder la cabeza bajo el ala. Probablemente seamos la única especie de la Tierra consciente de la inevitabilidad de nuestra muerte individual: me temo que pronto habremos de convertirnos también en la especie que verá llegar conscientemente su propio final o, cuando menos, el fin de su propia civilización.

Según afrontemos, más o menos bien, nuestra muerte individual, así afrontaremos la caída de nuestra civilización. No es muy distinto. Y, desde luego, no será la primera civilización que se desploma: los mayas y Creta pertenecen ya al pasado. Nacemos y morimos como nacen y mueren las estrellas, tanto individual como colectivamente. Ésa es nuestra realidad. Para nosotros, precisamente por su naturaleza efímera, la vida es preciosa. Porque, como escribe Lucrecio: «Nuestro apetito de vida es voraz; nuestra sed de vida, insaciable» (*De rerum natura*, III, 1084).

Pero, inmersos en esta naturaleza que nos ha hecho y que nos lleva, no somos seres sin hogar, suspendidos entre dos mundos, sólo parcialmente parte de la naturaleza, con la nostalgia de otra cosa. No; estamos en casa.

La naturaleza es nuestro hogar y en la naturaleza estamos en casa. Este mundo extraño, variopinto y asombroso que exploramos, donde el espacio se desgrana, el tiempo no existe y las cosas pueden no estar en ningún sitio, no es algo que nos aleja de nosotros: es sólo lo que nuestra natural curiosidad nos enseña de nuestro hogar. De la trama de la que nosotros mismos estamos hechos. Estamos hechos del mismo polvo de estrellas del que están hechas las cosas, y ya sea cuando nos hallamos inmersos en el dolor, ya sea cuando reímos y resplandece la alegría, no hacemos sino ser lo que no podemos dejar de ser: una parte de nuestro mundo.

Lucrecio lo expresa con palabras maravillosas:

... todos hemos nacido de la semilla celeste;
 todos tenemos el mismo padre,
de quien la tierra, la madre que nos alimenta,
 recibe límpidas gotas de lluvia,
y luego produce el luminoso trigo,
 y los árboles lozanos,
y la raza humana,
 y las estirpes de las fieras,
ofreciendo los alimentos con los que todos nutren

sus cuerpos, para llevar una vida dulce
y engendrar la prole...

(De rerum natura, II, 991-997)

Por naturaleza amamos y somos honestos. Y por naturaleza queremos saber más. Y seguimos aprendiendo. Nuestro conocimiento del mundo sigue aumentando. Hay fronteras, donde estamos aprendiendo y donde arde nuestro deseo de saber. Están en las profundidades más diminutas del tejido del espacio, en los orígenes del cosmos, en la naturaleza del tiempo, en el seno de los agujeros negros, y en el funcionamiento de nuestro propio pensamiento.

Aquí, en el límite de lo que sabemos, en contacto con el océano de cuanto no sabemos, brillan el misterio del mundo, la belleza del mundo, y nos dejan sin aliento.

NOTAS

1 El municipio de Condofuri está situado en la Bovesia, una zona geográfica de la provincia de Reggio Calabria donde se habla una lengua estrechamente emparentada con el griego antiguo. (*N. del T.*)

2. De *colla*, «cola». También para el lector hispano resulta evidente el doble sentido. (*N. del T.*)

Título de la edición original:
Sette brevi lezioni di fisica

Edición en formato digital: febrero de 2016

© de la traducción, Francisco J. Ramos Mena, 2016

© Adelphi Edizioni S.p.A., 2014

© EDITORIAL ANAGRAMA, S.A., 2016
Pedró de la Creu, 58
08034 Barcelona

ISBN: 978-84-339-3704-9

Conversión a formato digital: Newcomlab, S.L.

anagrama@anagrama-ed.es
www.anagrama-ed.es

CARLO ROVELLI



SIETE BREVES
LECCIONES DE
FÍSICA

Todo lo que necesitas saber sobre física,
el universo y nuestro lugar en el mundo
en siete brillantes lecciones.



ANAGRAMA
Colección Argumentos