

CARLO ROVELLI

¿Y SI EL TIEMPO
NO EXISTIERA?



Lectulandia

El nacimiento del universo, el destino de los agujeros negros, la realidad del tiempo, la mecánica cuántica o la teoría de la relatividad son algunos de los protagonistas del presente título. Objetos de estudio tanto de la física como de la filosofía antigua, estos fascinantes conceptos entrañan una dificultad de comprensión muchas veces imposible para el público no especializado.

Carlo Rovelli

¿Y si el tiempo no existiera?

ePub r1.0

Un_Tal_Lucas 22-12-2022

Título original: *Et si le temps m'existait pas?*
Carlo Rovelli, 2012
Traducción: María Pons Irazazábal

Editor digital: Un_Tal_Lucas
ePub base r2.1

PREFACIO A LA SEGUNDA EDICIÓN FRANCESA

Carlo Rovelli es físico teórico y uno de los iniciadores de la teoría de la gravedad cuántica de bucles, un tema de una dificultad matemática aterradora. Sin embargo, cuando lo conocí y lo escuché en una reunión interdisciplinaria, estuvo hablando de su trabajo de una forma tan clara que un adolescente de quince años lo habría seguido sin perder palabra, y de una forma tan apasionante que el joven oyente habría preguntado qué había que hacer para ser físico.

Carlo Rovelli trabaja a la vanguardia de la técnica, pero jamás cede al placer de la pirueta. Está pendiente de las cuestiones que trata de resolver. Esta conciencia de los problemas lo convierte en un divulgador mágico. De forma esquemática y transparente describe el cuadro de la física fundamental para aclarar sus fisuras, esas cuestiones abiertas en las que están sumergidos los físicos de hoy.

Y, más allá de la física, Rovelli se pregunta por la ciencia en su conjunto, por sus relaciones con los otros ámbitos de conocimiento y por su papel en la sociedad. El físico no es, no puede ser, un técnico desconectado de las realidades —puesto que es de la realidad de lo que pretende hablar—. El mundo que estudia en el acelerador de partículas y el mundo en el que se despierta todas las mañanas son el mismo. Mejor que cualquier otro científico, Carlo Rovelli nos hace sentir esta intensa conexión de la actividad del investigador con el runrún del mundo.

El editor italiano Sante Di Renzo tuvo la clarividencia de pedir a Carlo Rovelli que concibiera una obra destinada a los jóvenes que se sintieran atraídos por una carrera científica. A partir de muchas conversaciones sobre la carrera del físico nació la obra *Che cos'è il tempo? Che cos'è lo spazio?*

Cuando pensé en publicar esa obra, tras haber escuchado a Rovelli en una conferencia, él mismo me propuso tomar como base ese texto y ampliar lo relativo al contenido científico y la reflexión sobre la ciencia. Por tanto, el libro que les ofrecemos es una obra más acabada y más extensa, un auténtico «cono de pensamiento». En él aprendemos en qué dirección va la física de

mañana y por qué se encuentra con Aristóteles, a qué se parece un «grano» de espacio-tiempo y cómo el estudio de este tipo de cuestiones desempeña un papel importante en el camino de la civilización.

Más que una obra de ciencia, es una demostración de espíritu científico, esa actitud tan natural en los niños y tan difícil de conservar.

Élisa Brune
periodista científica

He dedicado gran parte de mi vida a la investigación científica, pero la ciencia fue para mí una pasión tardía. Cuando era joven, más que la ciencia, lo que me fascinaba era el mundo entero.

Crecí en Verona, en el seno de una familia tranquila. Mi padre, un hombre de una rara inteligencia, discreto y reservado, era ingeniero y dirigía su propia empresa. Él me transmitió el placer de contemplar el mundo con curiosidad. Mi madre, una italiana auténtica, desbordante de amor por su único hijo, me ayudaba en los trabajos de «investigación» que realizaba en la escuela primaria, y alimentaba mis ansias de descubrir.

Asistí al Liceo clásico de Verona, donde se estudiaba griego e historia más que matemáticas. Era una institución rica en estímulos culturales, pero pretenciosa y provinciana, dedicada a su misión de proteger a los privilegiados y la identidad de la burguesía local. Muchos profesores habían sido fascistas antes de la guerra, y lo seguían siendo en su fuero interno. Eran los años sesenta y setenta, y el conflicto entre generaciones estaba en plena ebullición. El mundo cambiaba rápidamente. A la mayoría de los adultos que me rodeaban les costaba mucho aceptar la evolución; se mantenían firmes en posturas defensivas y estériles. Confiaba poco en ellos, y menos aún en mis profesores. Chocaba continuamente con ellos y con cualquier figura autoritaria.

Mi adolescencia fue pura rebeldía. No me reconocía en los valores entre los que vivía, evolucionaba en medio de la confusión y no tenía ninguna certeza. Solo una cosa me parecía clara: el mundo que yo veía era distinto del que me hubiera parecido justo y hermoso. Soñaba con ser un vagabundo y vivir al margen de esta realidad que no me gustaba. Leía con avidez los libros que me hablaban de otras formas de vida y de otras ideas. Creía que en cada uno de los libros que todavía no había leído se ocultaban tesoros maravillosos.

Durante mis estudios universitarios en Bolonia, mi conflicto con el mundo adulto fue parejo al de una gran parte de mi generación. Queríamos cambiar

el mundo, hacerlo mejor, menos injusto; descubrir nuevas formas de vivir y de amar; experimentar nuevas formas de comunidad; probarlo todo. Nos enamorábamos continuamente y discutíamos hasta el agotamiento. Queríamos aprender a ver las cosas sin *a priori*. Teníamos momentos de desconcierto, y en otras ocasiones creíamos entrever el alba de un mundo nuevo.

Era una época en que se vivía de sueños. Viajábamos mucho: mental y efectivamente, en busca de amigos y de ideas. A los veinte años emprendí un viaje en solitario alrededor del mundo. Quería vivir la aventura, «buscar la verdad». Hoy, desde la perspectiva de los cincuenta años, esta ingenuidad me provoca risa pero, en cualquier caso, creo que era una buena elección, y en cierto modo todavía sigo inmerso en una aventura que empecé en aquella época. El camino no siempre ha sido fácil, pero las esperanzas descabelladas y los sueños sin límites no me han abandonado nunca; solo hacía falta tener el valor de seguirlos.

Junto con un grupo de amigos impulsamos una de las primeras radios libres de la época, radio Alice, en Bolonia. Los micrófonos estaban abiertos a todo el que quisiera expresarse a través de las ondas. Radio Alice impulsaba experiencias y utopías. Junto con dos amigos escribí un libro en el que se explicaba la revuelta estudiantil italiana de finales de los años setenta. Pero las esperanzas de revolución fueron sofocadas rápidamente y el orden se impuso. No es tan fácil cambiar el mundo.

A medio camino de mis estudios universitarios, me sentí más perdido que antes, con la sensación amarga de que los sueños compartidos por la mitad del planeta estaban a punto de desvanecerse. No tenía ni idea de qué iba a hacer con mi vida. Vencer en la carrera del ascenso social, progresar, ganar dinero y recoger algunas migajas de poder me parecía demasiado triste. El mundo entero estaba por explorar, y detrás de las nubes seguía imaginando la existencia de horizontes sin límites.

Entonces la investigación científica vino a mi encuentro, en ella descubrí un espacio de libertad ilimitada, una aventura tan extraordinaria como antigua. Hasta ese momento yo estudiaba porque tenía que aprobar, y sobre todo para retrasar el servicio militar obligatorio; no obstante, muy pronto las asignaturas que estudiaba empezaron a interesarme y, luego, a apasionarme.

En el tercer curso de la carrera de física aparece la «nueva» física, la del siglo xx: la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad de Einstein. Son ideas fascinantes, revoluciones conceptuales extraordinarias que transforman nuestra visión del mundo y trastornan las viejas ideas, incluso las que se creían más sólidas. A través de ellas se descubre que el mundo no se

corresponde con las apariencias. Se aprende a ver las cosas con otros ojos. Es un fantástico viaje mental. De este modo pasé de una revolución cultural abortada a una revolución de pensamiento en curso.

Gracias a la ciencia descubrí una forma de pensar que empieza estableciendo reglas para comprender el mundo y que después es capaz de modificar esas mismas reglas. Esa libertad en la búsqueda del conocimiento me fascinaba. Impulsado por la curiosidad, y tal vez por lo que Federico Cesi, amigo de Galileo y visionario de la ciencia moderna, llamaba «el deseo natural de saber», me encontré inmerso, casi sin darme cuenta, en problemas de física teórica.

De modo que mi interés por esta disciplina nació por accidente y por curiosidad más que por una elección consciente. En el Liceo sacaba buenas notas en matemáticas pero me atraía sobre todo la filosofía. Si en la universidad decidí estudiar física y no filosofía fue solamente porque mi desprecio por las instituciones vigentes me llevaba a considerar los problemas filosóficos demasiado importantes para ser discutidos en la escuela...

Por tanto, en el momento en que mi sueño de construir un mundo nuevo chocó con la realidad, me enamoré de la ciencia, que contiene un número infinito de mundos nuevos, y que me ofrecía la posibilidad de seguir un camino libre y luminoso en la exploración de lo que nos rodea. La ciencia fue para mí un compromiso que me permitía no renunciar a mi deseo de cambio y de aventura, mantener la libertad de pensar y de ser el que soy, minimizando a la vez los conflictos con mi entorno que esto implicaba. Es más, contribuía a una empresa que el mundo apreciaba.

Creo que una gran parte del trabajo intelectual o artístico tiene su origen en este hecho. Ofrece a los posibles desviados una especie de refugio. Al mismo tiempo, la sociedad necesita a este tipo de personas, ya que se mantiene en un estado de equilibrio dinámico: por un lado, unas fuerzas que aseguran su estabilidad y su permanencia, e impiden que el desorden destruya lo que ya ha sido construido; por el otro, el deseo de cambio y de justicia tiende a modificarla, a hacerla progresar y evolucionar. Sin ese deseo de cambio, la civilización no habría llegado jamás al punto en que se encuentra; seguiríamos adorando a los faraones.

Creo que la curiosidad y el deseo de cambio de la juventud, que están presentes en cada generación, son la primera causa de evolución de la sociedad. Al lado de las figuras de orden, que mantienen la estabilidad pero frenan la historia, se necesitan personas que vivan de sueños y se lancen a descubrir nuevos territorios, ideas originales, formas inéditas de ver y de

comprender la realidad. El mundo actual ha sido pensado y construido por quienes en el pasado fueron capaces de soñar. Solo nuevos sueños pueden dar vida a nuestro futuro.

Este libro presenta algunas etapas del camino que he recorrido siguiendo mi curiosidad y mis sueños. Habla de la fascinación por las ideas y de los amigos que he encontrado.

1. UN PROBLEMA EXTRAORDINARIO: LA GRAVEDAD CUÁNTICA

Cuando cursaba el cuarto año en la universidad, descubrí un artículo escrito por un físico inglés, Chris Isham, que trataba de la *gravedad cuántica*. El artículo explicaba que en la base de la física contemporánea hay un problema fundamental no resuelto, relacionado con la definición del tiempo y del espacio, es decir, con la estructura básica del mundo. Leí el artículo con avidez. No entendí gran cosa, pero el tema que el artículo presentaba me sedujo. Veamos las grandes líneas del problema.

El lamentable estado de la física fundamental

La gran revolución científica del siglo xx se compone de dos episodios de gran importancia. Por un lado, la *mecánica cuántica*, por el otro, la *relatividad general* de Einstein. La mecánica cuántica, que describe muy bien el mundo microscópico, transformó profundamente nuestros conocimientos sobre la materia. La relatividad general, que explica con precisión la fuerza de la gravedad, transformó radicalmente nuestros conocimientos sobre el tiempo y el espacio. Estas dos teorías han sido ampliamente confirmadas por la experiencia, y han permitido el desarrollo de una buena parte de la tecnología contemporánea.

Pero estas dos teorías conducen a dos maneras diferentes de describir el mundo, a primera vista incompatibles. Cada una de ellas parece escrita como si la otra no existiera. Lo que un profesor de relatividad general explica en clase carece de sentido para su colega que enseña mecánica cuántica a los mismos estudiantes en la clase de al lado, y viceversa. La mecánica cuántica utiliza las antiguas nociones de tiempo y espacio refutadas por la teoría de la relatividad general. Y la relatividad general utiliza las antiguas nociones de materia y energía, refutadas por la mecánica cuántica.

No hay ninguna situación física actual en la que se apliquen simultáneamente las dos teorías. Según la escala de los fenómenos, a veces se aplica una, a veces la otra. Las situaciones físicas en las que se aplican las dos teorías, como las distancias muy pequeñas, el centro de un agujero negro o los primeros momentos de la vida del Universo, implican niveles de energía difícilmente accesibles a nuestros instrumentos.

No sabemos cómo articular esos dos grandes descubrimientos; no tenemos un marco global para pensar el mundo. Nos encontramos en una situación de gran confusión, con explicaciones parciales e incompatibles entre sí, hasta el punto de que en realidad ya no sabemos qué son el espacio, el tiempo y la materia. La física fundamental de hoy se halla en un estado lamentable.

A lo largo de la historia se han producido situaciones similares, por ejemplo antes de la acción unificadora de Newton. Para Kepler, que observaba los planetas y las estrellas, los objetos describían elipses. Para Galileo, que estudiaba los objetos cayendo al suelo, describían parábolas. Pero Copérnico entendió que la Tierra es un lugar como cualquier otro, no tiene nada de particular en el Universo. Por tanto, ¿podía haber una teoría que funcionara en la Tierra y otra que funcionara en el cielo? Newton consiguió conciliar las dos visiones en una única teoría: aplicando una misma ecuación a los planetas y a las manzanas que caen.

Esta hermosa unidad prevaleció durante tres siglos. Hasta principios del siglo xx la física fue un conjunto de leyes bastante coherente, fundamentado en unas pocas nociones clave como el tiempo, el espacio, la causalidad y la materia. A pesar de producirse evoluciones importantes, estas nociones se mantuvieron básicamente estables. A finales del siglo xix empezaron a acumularse algunas tensiones internas y, durante el primer cuarto del siglo xx, la mecánica cuántica y la relatividad general pulverizaron estos fundamentos. La hermosa unidad newtoniana se había perdido.

Las dos teorías —mecánica cuántica y relatividad general— obtuvieron enormes éxitos y una verificación experimental constante; actualmente, forman parte de nuestros conocimientos establecidos. Cada una de las dos teorías modifica la base conceptual de la física clásica de una forma que para ella es coherente, pero no disponemos de un marco conceptual que pueda englobar *ambas* teorías. Por consiguiente, no tenemos medios para predecir lo que ocurre en el ámbito en que la gravedad empieza a presentar efectos cuánticos, a escalas inferiores a 10^{-33} cm. Esas dimensiones tan pequeñas son extremas, pero hay que poder describirlas. El mundo no puede depender de dos teorías incompatibles. En la naturaleza se producen realmente fenómenos

a escalas tan pequeñas, por ejemplo cerca del *Big Bang* o en las proximidades de un agujero negro. Si queremos comprender esos fenómenos, hemos de ser capaces de calcular lo que ocurre a esta escala. De una forma u otra hay que conciliar ambas teorías. Esta misión es el problema central de la *gravedad cuántica*.

Evidentemente, es un problema difícil. Pero, con la temeridad de un joven de veinte años, en el último curso de mis estudios universitarios decidí que este era el reto al que quería consagrar mi vida. Me seducía la idea de estudiar conceptos tan fundamentales como el tiempo y el espacio, así como el hecho mismo de que la situación parecía inextricable.

En Italia casi nadie estudiaba este problema. Mis profesores me desaconsejaron vivamente que tomara ese camino: «Es un camino que no conduce a ninguna parte», «nunca encontrarás trabajo», o bien: «deberías unirte a un equipo sólido y ya establecido». Pero muchas veces lo único que consiguen los consejos de prudencia de los adultos es reforzar la despreocupada testarudez de la juventud.

Cuando era niño leía los cuentos de un escritor italiano, Gianni Rodari. Uno de ellos cuenta la historia de Giovannino y del camino que no conduce a ninguna parte. El héroe vivía en un pueblo en el que había un camino que no conducía a ninguna parte. Pero como era curioso y testarudo, y pese a lo que todo el mundo le decía, quería ir a verlo. Y fue, y por supuesto encontró un castillo y una princesa, que lo cubrió de piedras preciosas. Cuando regresó al pueblo, tan rico, todo el mundo se precipitó hacia el camino, pero nadie encontró ni rastro del tesoro. Esta historia se me había quedado grabada. Con la gravedad cuántica había encontrado un camino que, según la opinión general, no conduciría a ninguna parte. Sin embargo, en él encontré a mi princesa y muchas piedras preciosas.

2. ESPACIO, PARTÍCULAS Y CAMPOS

Describamos el origen y la dificultad del problema de la gravedad cuántica de una forma algo más detallada, empezando por un concepto clave, el de espacio, que es el primero, históricamente, que fue puesto en tela de juicio. Después explicaré cómo la noción de tiempo sufrirá una transformación más espectacular aún.

La noción de espacio según la visión del mundo más corriente es la de un gran «contenedor» del mundo. Una especie de caja grande, regular, homogénea, sin una dirección preferente, donde se aplica la geometría de Euclides y en la que se desarrollan los acontecimientos del mundo. Todos los objetos que conocemos están formados por partículas que se desplazan en este espacio-caja. Y es en este espacio donde Newton construyó su potente teoría de la gravitación universal, que todavía hoy es la base de innumerables aplicaciones en todos los ámbitos de la tecnología y de la ingeniería.

Doscientos años después de Newton, a finales del siglo XIX, James Clerk Maxwell y Michael Faraday estudian la fuerza eléctrica entre objetos cargados, y esto los lleva a modificar esta descripción. Al espacio y a las partículas añaden un tercer ingrediente: el «campo» electromagnético, un nuevo «objeto» que tendrá una gran importancia en toda la física posterior.

El campo electromagnético es el soporte de las fuerzas eléctrica y magnética. Un campo es una especie de entidad difusa que llena todo el espacio. Faraday lo imagina como un conjunto de *líneas* que salen de las cargas eléctricas positivas y llegan a las cargas eléctricas negativas. La figura 1 muestra algunas de estas líneas. En realidad, son infinitas y ocupan todo el espacio de una manera continua, como los hilos de una tela de araña inmaterial dibujada en las tres dimensiones del espacio.

Por cada punto del espacio pasa una línea de Faraday. La dirección de esta línea, en ese punto, viene dada por un vector (una pequeña flecha) tangente a la línea. El campo ejerce una fuerza eléctrica sobre una carga eléctrica situada en este lugar, en la dirección de ese vector.

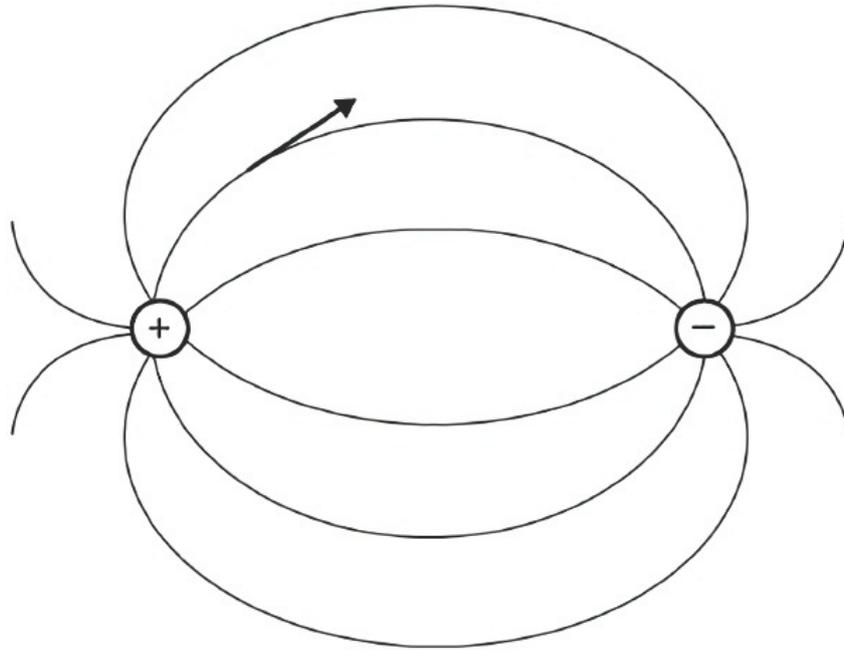


Figura 1. Campo eléctrico alrededor de dos cargas; el campo está compuesto de líneas, las líneas de Faraday. La dirección de la fuerza eléctrica en un punto está indicada por la flecha.

El gran descubrimiento de Faraday y de Maxwell fue comprender que ese campo es una entidad autónoma que existe independientemente de las cargas eléctricas. En ausencia de cargas, las «líneas de Faraday» también existen. Si no hay cargas a las que las líneas puedan llegar, las líneas se repliegan sobre sí mismas y forman curvas cerradas en el espacio, llamadas «bucles». En la figura 2 aparece representada una de estas líneas de Faraday. La dirección de la fuerza eléctrica que se aplica en un punto del espacio viene dada por el vector tangente a la línea en este punto.

El campo electromagnético no está generado por las cargas. Es una entidad autónoma, continuamente presente, que se ve modificada ocasionalmente por la presencia de cargas eléctricas, pero que no proviene de estas cargas. No las necesita para existir.

Fue Maxwell el que supo traducir las intuiciones de Faraday en fórmulas matemáticas y dedujo las consecuencias. Las ecuaciones de Maxwell describen el campo electromagnético contemplado por Faraday y, por tanto, las líneas de Faraday. Faraday, que era un experimentador genial y un gran visionario, carecía totalmente de técnicas matemáticas.

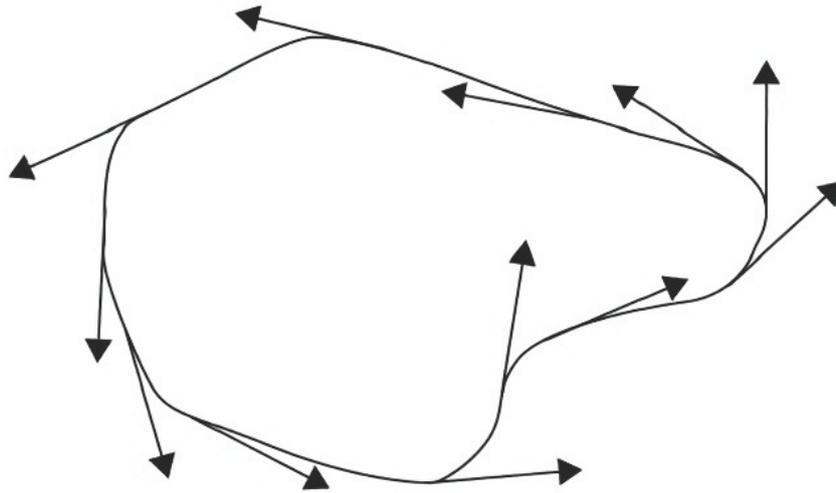


Figura 2. Una línea de Faraday cerrada, es decir, un bucle. Las flechas representan la dirección de la fuerza eléctrica que en cada punto es tangente a la línea de Faraday. Esas líneas llenan todo el espacio y constituyen el campo electromagnético.

La forma de las líneas de Faraday se rige por las ecuaciones de Maxwell. Cada una de las líneas no es ni fija ni arbitraria, sino que está regida por las ecuaciones de Maxwell: se deforma por la acción de las líneas vecinas y de las cargas eléctricas en movimiento. Cuando hay cargas, estas abren los bucles y dan al campo magnético el aspecto que se muestra en la [figura 1](#). El campo está compuesto de todas las líneas de Faraday y se comporta como un mar de líneas cambiantes. Las líneas se mueven continuamente, como las olas del mar, y el movimiento se propaga de forma gradual.

Cuando una deformación del campo se propaga de manera coherente de un punto a otro, se dice que entre estos dos puntos se desplaza una onda electromagnética. El tamaño y la dirección del vector que representa la fuerza eléctrica oscilan entonces de manera periódica. La velocidad y la amplitud de la oscilación definen las características de la onda: su longitud de onda y su intensidad. Hertz fue el primero en utilizar las ondas de radio para enviar informaciones a distancia, abriendo el camino a cientos de aplicaciones que poco a poco han enriquecido nuestra tecnología moderna y han cambiado la faz del mundo.

Maxwell tuvo la genialidad de comprender que la luz no es más que un movimiento ondulatorio rápido de las líneas del campo, una de las variedades de la radiación electromagnética. En el caso de las ondas de radio, la oscilación es lenta, en el caso de la luz, es rápida, pero se trata de un único fenómeno, una deformación periódica del campo electromagnético.

A veces se dice que el campo electromagnético es invisible, pero no es cierto, ya que lo que nosotros «vemos» no es otra cosa que el campo electromagnético. Cuando miramos alguna cosa, no somos directamente

sensibles al objeto, sino a las oscilaciones del campo electromagnético que hay entre el objeto y nosotros: a la luz reflejada por el objeto. Pensemos en lo que se ve en un espejo, o en una pantalla de cine, o en un holograma. En esos tres casos, no hay ningún objeto en el lugar donde creemos ver uno, sino tan solo la luz reenviada *como si* el objeto estuviera allí. El efecto es el mismo.

Los trabajos de Faraday y Maxwell modificaron un poco la visión del mundo de Newton, pero no de una manera fundamental. Seguimos considerando que hay un espacio-caja y que las cosas se mueven en este espacio. Simplemente, además del espacio-caja y de las partículas, ahora hay una tercera entidad que se ha añadido a las otras dos: el campo electromagnético.

La relatividad general

La profunda revolución en nuestra comprensión del espacio se produjo en 1915, con Einstein. Fascinado por los trabajos de Maxwell, Einstein intenta explicar la fuerza gravitatoria (esta fuerza que nos atrae hacia el suelo, que mantiene la Tierra en las cercanías del Sol, y la Luna en las cercanías de la Tierra). Entiende que hay que introducir un *campo gravitatorio*, similar al campo electromagnético. Del mismo modo que la fuerza eléctrica entre cargas es transportada por el campo electromagnético que ocupa el espacio entre ellas, la fuerza gravitatoria entre dos masas ha de ser transportada por un campo gravitatorio. Por tanto, ha de haber también «líneas Faraday» gravitatorias que unan las masas entre sí, formando un campo gravitatorio que ocupa todo el espacio, y que puede moverse, vibrar, ondularse. Einstein introduce el campo gravitatorio, y escribe sus ecuaciones —llamadas hoy ecuaciones de Einstein— sobre el modelo de las ecuaciones de Maxwell.

Si Einstein solo hubiera hecho esto, habría sido un gran científico, pero no un genio. Su esfuerzo de comprensión fue mucho más profundo. Al intentar interpretar la forma de las ecuaciones que describen ese campo, realizó un avance asombroso: comprendió que el campo gravitatorio y el espacio-caja de Newton son en realidad *una única y misma cosa*. Probablemente es su mayor logro.

Imaginemos que nos enteramos de que el señor A y el señor B son en realidad la misma persona. Hay dos maneras de entender este hecho: podemos decir que no existe el señor B, porque de hecho es el señor A; o podemos decir que no existe el señor A, porque de hecho es el señor B. Igualmente, el

descubrimiento de Einstein puede enunciarse en los dos sentidos. El primero: no hay campo gravitatorio y es el propio espacio el que se mueve y vibra y se deforma como las olas del mar. El segundo: no hay espacio, sino tan solo un campo gravitatorio en movimiento. El primer enunciado es el modo más frecuente de presentar las cosas —la divulgación científica presenta esta imagen de un espacio «elástico», que se curva ante la proximidad de un cuerpo macizo— pero es problemático porque induce a mantener la idea de que el espacio tendría una esencia propia, distinta a la de un campo. La idea de espacio está asociada a una entidad amorfa, pasiva, independiente de las cosas que lo ocupan. El espacio de la relatividad general, por el contrario, tiene una naturaleza semejante a la del campo electromagnético: es una entidad dinámica en interacción con los objetos que en él se encuentran. Por tanto, la mejor manera de describir el descubrimiento de Einstein es decir que el espacio no existe: se trata del campo gravitatorio. Newton había considerado el campo gravitatorio como una entidad especial, un espacio absoluto, en vez de reconocerlo como un campo entre otros.

Este descubrimiento es inesperado y espectacular. El espacio, que Newton había descrito como una caja fija y rígida, no existe: en su lugar hay un campo gravitatorio, objeto físico flexible y dinámico, de la misma naturaleza que el campo electromagnético.

De pronto el mundo ya no está hecho de partículas y de campos que viven en el espacio, sino únicamente de partículas y de campos, que podríamos decir que viven uno dentro del otro. El campo gravitatorio y el campo electromagnético se recubren el uno al otro, o se superponen el uno al otro, o se solapan... En definitiva, existen y actúan conjuntamente. Vivimos sobre el campo gravitatorio, o en el campo gravitatorio, pero no en un espacio-caja rígido.

Imaginemos una isla en el océano, poblada por muchos animales. Diríamos que vemos animales sobre una isla. Pero un joven biólogo marino llamado Einstanium realiza una investigación rigurosa y descubre que la isla no es una isla, sino que en realidad es una enorme ballena. Por tanto, los animales no viven sobre una isla. La isla es en sí misma un animal, y no hay *dos entidades* de naturaleza diferente —animales e islas—, sino tan solo entidades de la misma naturaleza, animales, que viven «amontonados unos sobre otros», sin disponer de tierra alguna. Del mismo modo, Einstein comprendió que los campos no necesitan vivir en un espaciocaja fijo, ya que pueden vivir «amontonados unos sobre otros». El espacio de Newton era como la isla que alberga a los animales, una base fija, estática, inmóvil.

Einstein demostró que el espacio no es una entidad distinta a los campos y a las partículas que en él se desplazan, sino que es un campo como los otros. Puede moverse, ondularse y curvarse, y su comportamiento lo rigen unas ecuaciones (las ecuaciones de Einstein), exactamente comparables a las del campo electromagnético.

Por supuesto, las modificaciones del campo gravitatorio son tan débiles, a nuestra escala, que el espacio nos parece perfectamente homogéneo y fijo, como el dorso de la ballena en la isla de los animales. Su estructura escapa a nuestra percepción, del mismo modo que las rugosidades de una hoja de papel no son perceptibles por nuestros dedos. Pero si dispusiéramos de instrumentos suficientemente precisos, podríamos ver las «ondulaciones» del espacio-tiempo, y por eso decimos que según la teoría de Einstein, el espacio-tiempo es curvo.

Einstein, por tanto, desarrolló su teoría en dos tiempos: primero hizo relativista la descripción de los movimientos de la mecánica clásica, es decir, sin gravedad (en la relatividad especial o restringida), y luego extendió esta descripción relativista a los movimientos de los cuerpos en situación de gravedad, en la relatividad general.

Esta es la *teoría de la relatividad general*. Es «relatividad» porque ya no es posible fijar una localización de los objetos en el espacio, sino tan solo una localización relativa de unos respecto de otros. Y es relatividad «general» porque, aunque la teoría se formuló como teoría de la fuerza de gravedad, su importancia es «general», puesto que modifica la noción de espacio y cambia nuestra comprensión del mundo físico en su globalidad.

Esta teoría posee una gran belleza, pero es poco accesible. Para su formulación exacta se necesitan matemáticas complicadas (matemáticas que describen campos que viven sobre otros campos y no en un espacio-caja). Pero cuando se consigue comprenderla bien, su claridad conceptual resulta fascinante. Algunos aspectos que nos parecen desconectados —el espacio, la fuerza de gravedad, los campos— se convierten en aspectos de una única entidad: el campo gravitatorio.

¿Cómo pudo concebir Einstein esta sorprendente teoría? La experiencia directa prácticamente no intervino en su trabajo. La teoría es el resultado del pensamiento puro, aplicado a lo que hasta entonces se sabía sobre el mundo. La relatividad general es una pura creación del genio de Einstein: razonando sobre la naturaleza del espacio y las teorías establecidas anteriormente, Einstein comprende que el espacio-tiempo es dinámico, encuentra la ecuación

correcta y calcula el desplazamiento aparente de las estrellas durante un eclipse.

El conocimiento surge, en este caso, de una comprensión profunda de las teorías existentes. Einstein nunca construyó sus teorías a partir de la nada. Para concebir la teoría especial, en 1905, analizó rigurosamente las teorías consolidadas ya en su época, la teoría de Maxwell y la mecánica de Galileo-Newton, y se centró en las contradicciones aparentes entre estas teorías (volveré sobre esta cuestión en el capítulo 6). Para la relatividad general, en 1915, examinó las contradicciones entre la teoría de la gravedad de Newton y la relatividad especial. Utilizó las teorías establecidas como base empírica para formular una conceptualización nueva que las englobara. Las teorías existentes eran para él «datos experimentales» (pues estaban ampliamente verificadas) que se dedicaba a estructurar a un nivel superior, del mismo modo que las teorías de Kepler y de Galileo constituyeron el material de base para la teoría de Newton. De modo que los descubrimientos de Einstein, como los de Newton, lejos de ser puras especulaciones, están fuertemente anclados en el empirismo, aunque los datos de la experiencia utilizados ya están estructurados en teorías anteriores.

Hace treinta años, la relatividad general era considerada una teoría magnífica pero exótica, muy especulativa. Desde entonces se ha producido un *boom* de confirmaciones experimentales y de aplicaciones de la relatividad general. Encontramos aplicaciones en ámbitos muy diversos: desde la astrofísica a la cosmología y a los experimentos que ponen de manifiesto las ondas gravitacionales (las vibraciones de las líneas de Faraday gravitatorias) predichas por la teoría.

Entre las predicciones de la teoría confirmadas de forma espectacular mencionaré solamente la existencia de los agujeros negros que han sido perfectamente identificados en el Universo. Y entre las aplicaciones, el GPS (*Global Positioning System*) que todos conocemos. Ese pequeño aparato, que encontramos en las tiendas de deporte o en los proveedores de equipamientos para coches y que nos proporciona nuestra posición exacta en el planeta, no podría funcionar si no tuviera en cuenta la relatividad general.

Ahora bien, esta revolución no es la única que cambió la física del siglo xx. La mecánica cuántica también cambió nuestra forma de pensar los objetos y la materia.

La mecánica cuántica

La noción de objeto, fundamental en la teoría de Newton, ya había evolucionado con Faraday y Maxwell. El mundo ya no estaba constituido solamente de partículas, es decir, de minúsculas «bolitas» sólidas, sino también de campos, entidades difusas. Pero la revolución de la noción de objeto que se produce con la mecánica cuántica es mucho más radical. Gracias a un largo trabajo de investigación experimental con los átomos, las radiaciones y la luz, y a una lucha teórica épica (cuyos héroes son numerosos: Max Planck, Albert Einstein —¡sí, también él!—, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Paul Dirac...), se descubre que la visión común de la materia, la mecánica newtoniana, no puede aplicarse de ningún modo a los objetos microscópicos. Hay que sustituirla por una «mecánica cuántica».

Esta nueva mecánica aporta dos cambios importantes. Primera novedad: cuando nos situamos en el mundo microscópico, nos encontramos con una «granularidad», o discontinuidad. Por ejemplo, un objeto del mundo microscópico que se desplaza en un espacio limitado no puede moverse a cualquier velocidad, sino solo a unas determinadas velocidades; se dice que su velocidad está «cuantificada». Muchas magnitudes físicas tienen esta estructura discontinua, cuantificada. La energía de un átomo, por ejemplo, no puede adoptar cualquier valor, sino solo determinados valores (los «niveles de energía» del átomo) que pueden calcularse a partir de la teoría. Todo sucede como si esta energía fuese granular: formada por pequeños paquetes de energía, o «cuantos» de energía. Lo mismo ocurre con los campos. El campo electromagnético, ese conjunto de líneas en movimiento del que hemos hablado, cuando se observa a una escala muy pequeña, no es continuo, sino que se manifiesta en «pequeños paquetes» de energía, una especie de *granos* o de «cuantos» que llamamos fotones.

La otra novedad de la mecánica cuántica es que en todo movimiento hay un componente de azar, una indeterminación intrínseca. Contrariamente a lo que Newton había supuesto, el estado de una partícula en un momento dado no determina exactamente lo que ocurrirá en el instante siguiente. La manera en que evolucionan las cosas a escala microscópica está regida por leyes probabilísticas: se puede calcular con gran precisión la *probabilidad* de que algo suceda (el número de veces en las que esto ocurrirá si repetimos el experimento un gran número de veces), pero no predecir el futuro con certeza. Por tanto, la dinámica ya no es determinista sino probabilística. A partir de

este hecho, ya no puede describirse una partícula por su posición, sino por una «nube» de probabilidades que representa el conjunto de las probabilidades de cada posición en que la partícula podría encontrarse: allí donde la nube es más densa, la probabilidad de encontrar la partícula es mayor. De modo que a cualquier partícula o fotón se le puede asociar una nube de probabilidades. El movimiento de una partícula se convierte así en «la evolución de la probabilidad de presencia de la partícula».

Se abandonan, pues, el continuo y el determinismo, dos estructuras básicas del pensamiento clásico sobre la materia. El mundo observado desde muy cerca es discontinuo y probabilístico.

Esto es lo que nos han enseñado las dos grandes revoluciones conceptuales de principios del siglo xx.

Gravedad cuántica

Llegamos por fin al núcleo del problema de la gravedad cuántica. ¿Qué ocurre cuando intentamos combinar lo que hemos aprendido con la mecánica cuántica y lo que hemos aprendido con la relatividad general?

Por una parte, Einstein descubrió que el espacio es un campo, como el campo electromagnético. Por otra parte, la mecánica cuántica nos enseña que todo campo está formado de «cuantos», y que solo podemos describir la «nube de probabilidades» de estos cuantos. Si juntamos las dos ideas, la consecuencia inmediata es que el espacio, es decir, el campo gravitatorio, también ha de presentar una estructura granular, exactamente igual que el campo electromagnético. Por tanto, debe haber «granos de espacio». Además, la dinámica de esos granos ha de ser probabilística. De modo que el espacio ha de ser descrito como una «nube de probabilidades de granos de espacio»... Es un concepto que da un poco de vértigo, dado que está muy alejado de nuestra intuición habitual, pero es la visión que se desprende de nuestras mejores teorías. El espacio-caja fijo de Newton ya no existe. El espacio es un campo agitado por ondas, y su estructura está hecha de granos que obedecen a leyes probabilísticas.

Ahora bien, ¿qué significa «granos de espacio»? ¿Cómo pueden describirse? ¿Con qué matemáticas? ¿Qué ecuaciones los rigen? ¿Qué significa la expresión «nube de probabilidades de granos de espacio»? ¿Qué consecuencias tendrá esto sobre lo que observamos y medimos? Este es el problema de la gravedad cuántica: construir una teoría matemática que

describa estas nubes de probabilidades de granos de espacio y comprender lo que significan.

No obstante, el problema no se acaba aquí. En 1905, con la relatividad especial, Einstein también estableció que el espacio y el tiempo no podían describirse por separado: están estrechamente vinculados el uno con el otro y forman un todo indisociable, el *espacio-tiempo*, lo que significa que si el espacio es sensible a la presencia de las masas, y modificado por ellas, el tiempo también lo es. La manera en que transcurre depende de la presencia y del movimiento de los cuerpos. Hasta aquí he estado diciendo que la noción de espacio ha de ser reemplazada por la de campo gravitatorio, pero no es del todo exacto: en realidad, es la noción de espacio-tiempo la que ha de ser reemplazada por la de campo gravitatorio. Y, por tanto, es el espacio-tiempo el que ha de convertirse en granular y probabilístico, no solo el espacio. Ahora bien, ¿qué es un tiempo probabilístico?

Para llegar a una nueva teoría, debemos construir un esquema mental que nada tiene que ver con nuestra concepción usual del espacio y del tiempo. Hay que pensar en un mundo en el que el tiempo ya no es una variable continua que fluye, sino que se convierte en otra cosa, basada en esa nube de probabilidades de granos de espacio-tiempo.

Ese es el enorme problema no resuelto cuya existencia descubrí en mi cuarto año de universidad.

Mientras escribía con mis amigos un libro sobre la revolución estudiantil (libro que no gustó a la policía y que me costó una paliza en la comisaría de Verona: «¡Dinos el nombre de tus amigos comunistas!»), me sumergía cada vez más en el estudio del espacio y del tiempo, intentando comprender los escenarios que hasta entonces se habían propuesto.

Conseguí entrar en un programa de doctorado en Padua, y escogí como director de tesis a un profesor que no seguía mi trabajo muy de cerca, sino que me permitía continuar el camino que yo quería seguir. Dedicué los años de la tesis a estudiar de manera sistemática todo lo que se conocía sobre el problema de la gravedad cuántica. Los otros doctorandos publicaban ya sus primeros artículos, mientras que yo pasé los tres años de la tesis sin publicar absolutamente nada. Lo que me interesaba no era la carrera: era estudiar y comprender.

Por aquel entonces, había pocas ideas para resolver el problema, y además se hallaban en estado embrionario. La vía más prometedora estaba vinculada a una ecuación llamada *ecuación de Wheeler-DeWitt*, que era, en principio, «la ecuación cuántica completa del campo gravitatorio». Es la ecuación que

se obtiene si se combinan las ecuaciones de la relatividad general con las de la mecánica cuántica, pero presentaba toda clase de dificultades: estaba mal definida desde un punto de vista matemático, su significado físico era muy oscuro y no permitía calcular gran cosa. De modo que la situación que descubrí en los años de la tesis era muy confusa.

Treinta años más tarde, las cosas han cambiado mucho. Hoy se conocen posibles soluciones al problema de la gravedad cuántica, aunque ninguna es completa ni obtiene consenso.

Mi suerte y mi gran felicidad fue participar en la construcción de una de esas soluciones posibles: la *loop quantum gravity*, la «teoría de los bucles».

3. NACIMIENTO DE LA TEORÍA DE LOS BUCLES

Mientras elaboraba la tesis, me dediqué a viajar como antes, en busca de nuevas ideas y de nuevos amigos, pero en esta ocasión con un objetivo mucho más preciso: encontrar a personas interesadas en la gravedad cuántica y en los problemas del tiempo y del espacio. Fui al encuentro de las figuras mundiales más importantes en el campo de la gravedad cuántica, gracias a unos fondos procedentes de diversas fuentes: los que concedía la ley italiana a los doctorandos para ir a estudiar al extranjero, una beca asignada por una fundación privada de cuya existencia me enteré por una nota colgada en el departamento de Física en Trento, y mis propios recursos. Anunciaba mi visita por carta (el correo electrónico no existía aún) y me iba.

Londres y Siracusa

La primera persona que conocí fue Chris Isham, el autor del artículo que había suscitado mi primer entusiasmo por el tema. Pasé dos meses con él en el Imperial College de Londres, donde por primera vez entré en contacto con el mundo variopinto e internacional de los investigadores en física teórica: jóvenes con traje y corbata mezclados con toda naturalidad con investigadores descalzos, de largos cabellos recogidos con cintas de colores; allí se cruzaban todas las lenguas y todas las fisonomías del mundo, y flotaba en el ambiente una especie de alegría de la diferencia, compartiendo un mismo respeto por la inteligencia. Encontré en aquel lugar buena parte del espíritu libre y alegre de las comunidades *hippies* que tanto había apreciado en mis viajes anteriores.

Chris Isham era el gurú de la gravedad cuántica. Sabía todo lo que se puede saber sobre el problema, y también sobre el psicoanálisis junguiano, la teología, y muchos otros temas que se mezclaban alegremente en sus discursos. Tenía un carácter amable y tranquilo, a medio camino entre el gran sabio capaz de dar a cada uno el consejo justo y el eterno joven perennemente

asombrado ante el misterio del mundo. Le expuse mis primeras ideas, muy débiles, y sobre todo lo escuché. Con suma amabilidad me hizo ver los errores y la imprecisión de mis consideraciones. Hice fotocopias de toda la información que había en el College sobre el tema y leí muchísimo. Reflexionaba sobre todas estas novedades durante los largos paseos en torno al Imperial College, en los jardines de Kensington, unos jardines mágicos por los que sobrevuela el espíritu de Peter Pan, el niño que no quería crecer...

Un día, Chris me dijo que en Estados Unidos un joven investigador indio, Abhay Ashtekar, había logrado reescribir la teoría de la relatividad general de Einstein con alguna ligera diferencia que permitiría simplificar el problema. Según Chris, probablemente sería más fácil estudiar la gravedad cuántica partiendo de la nueva formulación de Ashtekar.

De modo que me fui a Estados Unidos, echando mano de nuevo de mis propios recursos, para conocer a ese investigador que trabajaba en la universidad de Siracusa. Era Siracusa de Estados Unidos, no de Sicilia, pero en cualquier caso la idea de ir a una ciudad homónima de aquella en la que vivió Arquímedes, uno de los más grandes científicos de todos los tiempos, me parecía de buen augurio.

Pasé allí dos meses estudiando esa nueva formulación que todavía no había sido publicada. Abhay irradiaba energía. Había reunido un grupo reducido que dirigía con el encanto de su personalidad meticulosa y tenaz. Congregaba a sus colaboradores en una sala y cubría las negras pizarras con su escritura fina y precisa, para hacer una y otra vez «el balance de la situación», enumerar las cuestiones no resueltas y debatirlas. Su forma de pensar era analítica: insistía mil veces en el mismo razonamiento, lo corregía, lo revisaba hasta el momento en que empezaba a apuntar un fallo y en que se desvelaba otra posible dirección, invisible hasta entonces. No aceptaba el más mínimo error o zona de sombra en su pensamiento. Representaba una especie de equilibrio mágico entre Oriente y Occidente, una de esas formas de inteligencia nueva que nacen cuando civilizaciones distintas tienen el valor de mezclarse. Yo participaba en esas reuniones, ávido de aprender.

Al mismo tiempo empecé a redactar mis primeros artículos de física, y acudí sin invitación ni ayuda financiera a los simposios donde se debatía este tema. En uno de esos coloquios, en Santa Bárbara, California, supe de la existencia de un joven investigador estadounidense llamado Lee Smolin, que utilizaba la nueva fórmula de la relatividad general de Ashtekar. Junto con su amigo Ted Jacobson, había obtenido extrañas soluciones a la ecuación de Wheeler-DeWitt. De modo que me fui a la universidad de Yale a conocer a

Lee Smolin, a fin de saber en qué coincidían esas soluciones, y ese fue el principio de una gran amistad.

Yale

La víspera de mi partida de Siracusa hacia Yale, me llamó mi novia desde Italia para anunciarme el fin de nuestra relación. Desesperación total. Estuve a punto de anular el viaje. Pero era demasiado tarde para renunciar y decidí marchar pese a todo, con una enorme tristeza. Cuando me reuní con Lee Smolin, intimidado, empecé a hablarle de mis estudios y luego, de repente, me eché a llorar. Lee se quedó estupefacto. Le expliqué las razones de mi extraño comportamiento. Él me habló también de la ruptura con su novia... Dejamos la física a un lado y pasamos la tarde navegando en un pequeño velero, hablando de nuestras vidas y de nuestros sueños.

Al día siguiente, Lee empezó a explicarme las dificultades que tenía para intentar comprender las nuevas soluciones de la ecuación de Wheeler-DeWitt elaboradas con Ted Jacobson. El tipo de razonamiento de Lee era totalmente opuesto al de Ashtekar: únicamente miraba hacia delante. Tratando de traspasar la oscuridad, adivinaba lo que podía haber detrás de la pantalla de nuestra ignorancia. No tenía ningún reparo en intentar soluciones extrañas, ya que una sola intuición que funciona vale por mil sugerencias desechables. Lee era un visionario, al estilo de un Giordano Bruno, que fue el primero en hablar de un espacio infinito lleno de una infinidad de mundos, o de un Kepler, que fue el primero en liberar los planetas de las esferas cristalinas y dejarlos seguir trayectorias puramente matemáticas en el espacio: hombres que supieron soñar nuevas formas de concebir el mundo.

La extrañeza de las soluciones concebidas por Lee y Ted residía en que cada una de ellas estaba asociada a una curva cerrada en el espacio, un anillo, un *bucle*. ¿Qué significaban esos bucles? Durante nuestras largas discusiones nocturnas en el campus de Yale, mientras reflexionábamos una y otra vez sobre el problema, descubrimos una solución: esos bucles habían de ser las líneas de Faraday del campo gravitatorio cuántico. Se trataba de líneas distintas, y no del conjunto continuo de líneas del campo clásico, porque se trataba de la teoría cuántica: en la gravedad cuántica, el campo gravitatorio se rompe en líneas de campo separadas unas de otras, del mismo modo que en la teoría electromagnética cuántica el campo electromagnético se rompe en fotones.

Y puesto que el espacio no es nada más que el campo gravitatorio, no podemos decir que esos bucles están inmersos en el espacio: ¡son el espacio! El espacio está constituido por esos bucles. Esto es lo que nos decían las ecuaciones. Así nació la idea que había de desembocar en lo que hoy llamamos la gravedad cuántica de bucles, en la que trabajan ahora centenares de investigadores en todo el mundo.

Durante varias semanas nos dedicamos a reescribir frenéticamente toda la teoría de Wheeler-DeWitt en términos de bucles. Conseguimos obtener una nueva versión de la ecuación de Wheeler-DeWitt mucho mejor definida que la ecuación original, y le encontramos muchas soluciones, a la vez que empezábamos a comprender su significado.

La solución que estaría determinada por un solo bucle representa un universo que consiste tan solo en un «filamento de espacio» y nada más. La existencia teórica de estos universos constituidos por un solo bucle era el primer elemento que confirmaba la naturaleza granular, o cuántica, del espacio. Para representar nuestro mundo, «bastaba» superponer un gran número de soluciones constituidas cada una por un único bucle. Se obtenía así un «tejido» formado por un número finito de bucles. Contrariamente al campo clásico, donde el número de líneas de Faraday es infinito, en el campo gravitatorio cuántico se puede contar el número de bucles. El espacio está tejido de esos objetos de una dimensión, los bucles, cuyas mallas se encadenan en las tres dimensiones para formar un tejido 3d. Y del mismo modo que una camiseta desde lejos parece lisa, mientras que si se mira con una lupa se pueden contar los hilos, el espacio nos parece un continuo, pero a escala muy pequeña se pueden contar los bucles.

En ausencia de masas, los bucles permanecen cerrados sobre sí mismos. Si están cerca de una masa, los bucles se abren, igual que los bucles del campo electromagnético se abren por la acción de cargas eléctricas. Por supuesto, no se trata en este caso de masas en sentido macroscópico. Los bucles del campo gravitatorio tienen un tamaño de unos 10^{-33} cm (la escala de Planck, la dimensión física más pequeña posible), es decir, que son miles de millones de veces más pequeños que los núcleos de los propios átomos. El «tejido» formado por los bucles es mucho más apretado que los ensamblajes de átomos que «viven» dentro. Pueden interpretarse como grandes perlas bordadas en el fino tejido de una camisa, o tal vez como peces en un mar donde cada molécula de agua corresponde a un bucle. Por tanto, es al nivel de las partículas elementales y de la escala de Planck que se producen las interacciones elementales entre masas y bucles. Un electrón tendrá como

efecto abrir los bucles de su vecindario. De modo que el electrón o cualquier otra partícula a la escala de Planck se halla en el extremo de un determinado número de líneas del campo gravitatorio.

Podríamos decir que esta teoría consigue cuantificar el espacio, que se ha vuelto granular, o discontinuo. Yo prefiero decir que ya no hay espacio. No hay más que partículas, campos y bucles de campo gravitatorio, todo ello en interacción.

La figura 3 presenta un modelo esquemático de la estructura fina del espacio: un encabalgamiento de bucles. En aquella época construí un modelo para ilustrar la idea, y para ello visité todos los cerrajeros de Verona con objeto de comprar todos los anillos de llaveros que pudiera encontrar.

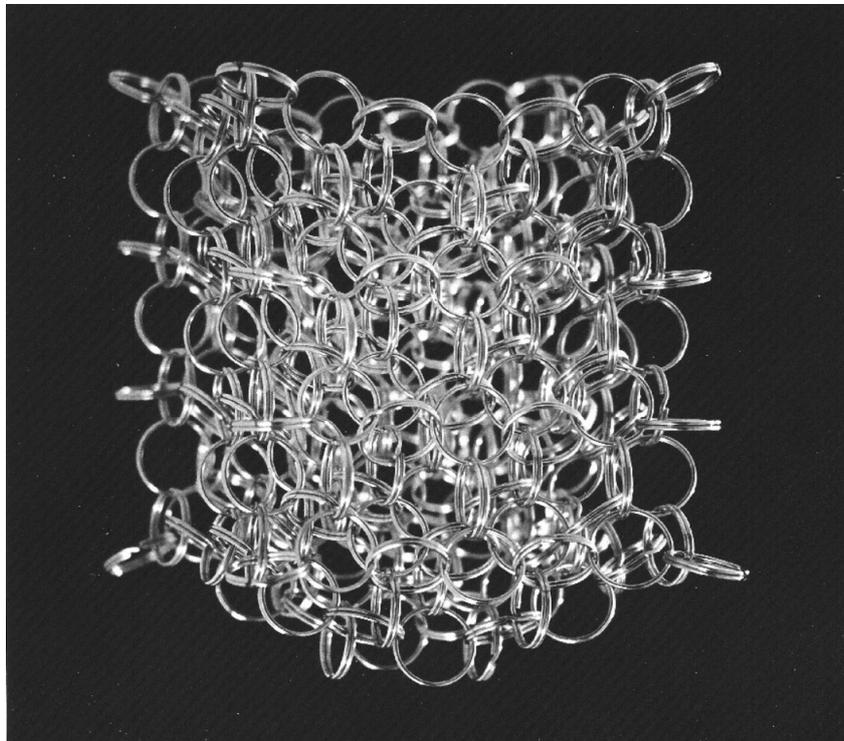


Figura 3. La primera imagen del espacio sugerida por la teoría de los bucles. A la escala más pequeña, el espacio es un conjunto de pequeñas anillas.

Fue una época maravillosa y llena de entusiasmo. Al cabo de unas semanas fuimos a Siracusa para discutir con Abhay Ashtekar, luego a Londres, para discutir con Chris Isham, y más tarde asistimos a un gran congreso de física en Goa, India, donde anunciamos por primera vez públicamente nuestros resultados. Puede decirse que la fecha del nacimiento «oficial» de la teoría de los bucles coincide con la celebración de este congreso de 1987. Nuestros resultados muy pronto atrajeron la atención y empezamos a recibir reacciones positivas de parte de la comunidad científica.



Figura 4. Yo, en aquella época, metido de lleno en los bucles.

Honestidad intelectual

El trabajo realizado con Lee Smolin en Yale cambió mi vida tanto como cambió la suya. El artículo que publicamos conjuntamente sigue siendo uno de los artículos más citados en el campo de la gravedad cuántica y es el origen de nuestras respectivas carreras en las instituciones científicas. La amistad que me une a Lee se ha mantenido intacta desde entonces y es el resultado de esta buena colaboración inicial, y especialmente de un episodio inolvidable, que me marcó para siempre y que explica el inmenso respeto que siento hacia él.

El día en que decidimos que nuestros resultados estaban suficientemente desarrollados para escribir un artículo, Lee vino a verme a mi despacho de Yale con un aire serio. Los dos éramos conscientes de que nuestros resultados tenían una importancia significativa. Lee me recordó que cuando empezamos a trabajar juntos, uno de los primeros días de mi estancia en Yale, fui yo el que se presentó en su despacho con un esbozo de representación de la gravedad cuántica en forma de bucles, y me propuso que escribiera yo un primer artículo corto para conservar la paternidad de la idea; después

escribiríamos los dos un artículo presentando todos los desarrollos elaborados conjuntamente.

Su propuesta era absurda: mi idea inicial era muy vaga, y sin su colaboración habría seguido siendo confusa y sin valor. Pero a Lee le preocupaba mi situación, ya que yo era algo más joven que él, todavía no tenía una plaza y era totalmente desconocido en el mundo científico. No quería privarme del reconocimiento de mi aportación. Rechacé su propuesta: habría sido injusto retirar su nombre del primer anuncio de *nuestra* idea. No obstante, este generoso ofrecimiento de Lee tuvo en mí un efecto notable, no solo en nuestra amistad, sino también en mi modo de concebir la ciencia.

El mundo de la ciencia, como pude descubrir más tarde con tristeza, y a menudo en perjuicio mío, no es un cuento de hadas. Robar ideas es algo frecuente. Muchos investigadores desean a toda costa ser los primeros en formular una idea, aunque se la hayan robado a otros, o en reescribir la historia a fin de atribuirse las etapas más importantes. Esto genera un clima de desconfianza y de sospecha que envenena la vida y dificulta gravemente el progreso de la investigación. Conozco a muchos investigadores que se negarán a hablar de las ideas sobre las que están trabajando antes de haberlas publicado, con el resultado de limitar la discusión, que es el alma de la ciencia, y de envenenar las relaciones.

En un minuto, Lee Smolin me enseñó que la desconfianza no es necesaria. Me ofreció su integridad científica absoluta hasta rozar el exceso. Su concepto de la ciencia demuestra que lo más importante es investigar y explorar juntos, y después mostrarse perfectamente honesto y generoso en el reparto de méritos cuando se descubre alguna cosa.

Esta lección me marcó para siempre, y he intentado seguirla. Hablo libremente de mis ideas a quien quiera escucharlas, sin ocultar nada, e intento convencer a mis alumnos de que hagan lo mismo, aunque no siempre me hacen caso. Eso no impide que se produzcan accidentes, por supuesto. Como a todos los que se dedican a la ciencia, a veces me han robado ideas, de forma voluntaria o involuntaria. Y también me han dirigido reproches por haber publicado resultados que se inspiran en alguna conversación con otros. En un mundo en que se produce un intercambio constante de ideas, es fácil perder el rastro de las fuentes, y tomar por una idea propia una cosa que se ha escuchado y se ha transformado tras una reflexión. En este caso, basta por lo general una simple llamada telefónica: «¿No te acuerdas que fui yo quien te habló de esto?». Entonces uno se apresura a rectificar las fuentes, y vuelve la calma. El mundo no es perfecto y hay que aceptar a las personas tal como son.

Yo he intentado vivir a la altura de la lección de claridad y de honestidad que me dio Lee. Sé que puedo confiar totalmente en él, y esta es una de las razones de la estima y de la amistad que le tengo.

Roma

Dediqué los años siguientes a desarrollar la teoría. Había terminado la tesis y obtuve una beca del INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare). Como no pertenecía a ningún grupo de investigación, podía utilizar esta beca para ir donde quisiera. Decidí ir a la universidad de Roma, La Sapienza («La sabiduría»), porque me parecía el lugar más interesante de Italia desde el punto de vista científico, además de tener un nombre irresistible. En Roma estaban los más importantes físicos teóricos italianos. El director del departamento me asignó una mesa en el sótano, donde pasé unos años, absorto en el desarrollo de la nueva teoría e ignorado por todo el mundo. Cuando se acabó el dinero de la beca, no logré encontrar otro medio de financiación. Nicola Cabibbo, el director del INFN, había oído hablar de mis trabajos en Estados Unidos e intentó conseguirme un contrato fijo, pero hubo un cambio en la situación política en el INFN y sus intentos no tuvieron éxito.

Ahorrraba sobre todo para seguir viviendo, y tuve que pedir ayuda a mi padre, quien, pese a los obstáculos, creía en mi pasión científica, me apoyaba, y de vez en cuando me enviaba un cheque. Fue una época difícil en mi aprendizaje. Quería ser físico, pero mi trayectoria profesional parecía estar en un punto muerto. La esperanza de obtener una plaza en la universidad era muy débil, y más aún porque trabajaba en un tema que no interesaba a nadie en Italia. Pasé por momentos de angustia.

Pero en el momento en el que la noche es más oscura y más fría, es cuando la luz decide aparecer. Un día sonó el teléfono. Era el director del departamento de física de una universidad estadounidense que me llamaba para ofrecermé una plaza de profesor. Se trataba de la universidad de Pittsburgh, donde trabajaba Ted Newman, uno de los científicos más importantes en el mundo de la relatividad general.

A primera vista, no me sedujo mucho la idea de ir a vivir a una ciudad como Pittsburgh, pero lo comenté con un amigo mío de Roma, con quien paseaba de noche junto a la *fontana* de Trevi, y me dijo que no le parecía muy sensato preferir ser un parado en Italia a profesor en Estados Unidos. Si quería tener la libertad de trabajar en lo que me interesaba, esta era la ocasión.

Pasé diez años en Pittsburgh, trabajando con Ted y con muchos otros, interesándome por distintos problemas de gravedad cuántica, de relatividad general y, sobre todo, desarrollando la teoría de los bucles.

4. INTERLUDIO: LA CIENCIA O LA EXPLORACIÓN PERMANENTE DE NUEVAS FORMAS DE PENSAR EL MUNDO

Una de las mejores sorpresas que me esperaban en Pittsburgh era el Center for the History and Philosophy of Science, quizá el centro de filosofía de la ciencia más importante de Estados Unidos. Se trata de una institución extraordinaria en la que convergen visitantes de todo el mundo, y donde se pueden discutir todas las formas de pensamiento. Interesado y fascinado por la filosofía desde siempre, asistí a los seminarios y a las conferencias del Centro. Allí pude codearme con filósofos eminentes y especializados en filosofía de la física, como Adolf Grünbaum y John Earman, que estaban interesados en los problemas de espacio-tiempo y dispuestos a discutir con un físico. Esto suponía para mí una extraordinaria ampliación de mi horizonte y un retorno a los intereses de mis años de juventud. Se entabló un diálogo muy vivo, que me proporcionó ideas y perspectivas fundamentales para mi trabajo de físico.

El diálogo entre ciencia y filosofía

Estoy convencido de que el diálogo entre ciencia y filosofía es necesario. En el pasado, desempeñó un papel muy importante en el desarrollo de la ciencia, especialmente en los momentos de mayor evolución conceptual de la física teórica. Galileo y Newton, Faraday y Maxwell, Bohr, Heisenberg, Dirac y Einstein, por no mencionar más que ejemplos muy notables, se alimentaron de filosofía, y no hubieran podido realizar los saltos conceptuales inmensos que realizaron si no hubieran poseído esta cultura filosófica. Esto se desprende claramente de sus obras, en las que los problemas conceptuales y filosóficos desempeñan un papel esencial sugiriéndoles cuestiones y abriéndoles nuevas perspectivas. La influencia directa de ideas filosóficas es

muy clara, por ejemplo, en el nacimiento de la mecánica newtoniana, de la teoría de la relatividad y de la mecánica cuántica.

Durante la segunda mitad del siglo xx, la física fundamental se mantuvo alejada de este diálogo con la filosofía. La principal razón es que los problemas de que se ocupaba tenían un carácter más técnico que conceptual. La mecánica cuántica y la relatividad general acababan de descubrir nuevos territorios, y era prioritario estudiar sus consecuencias y sus posibles aplicaciones. La física atómica, la física nuclear, la física de partículas, la física de la materia condensada y muchas otras disciplinas se han podido desarrollar sobre la base conceptual sólidamente establecida de la mecánica cuántica; la astrofísica, la cosmología y el estudio de los agujeros negros y de las ondas gravitacionales se han desarrollado sobre la sólida base conceptual de la relatividad general. Solo hoy, al intentar combinar ambas teorías básicas, la física se enfrenta de nuevo a problemas fundamentales. Creo que se necesita nuevamente una conciencia filosófica desarrollada.

Esto también es cierto desde un punto de vista metodológico: un científico siempre orienta su investigación en función de ideas de carácter epistemológico de las que es más o menos consciente. Y es preferible ser consciente de ello a dejarse guiar por *a priori* metodológicos cuya fuerza se ignora.

La filosofía de la ciencia anglosajona concede mucho más interés a la ciencia contemporánea que la filosofía de la ciencia en la Europa continental. Por mi educación italiana me siento más cercano a la filosofía continental europea que a la anglosajona, pero desde que me instalé de nuevo en Europa me ha resultado difícil recuperar el diálogo que había mantenido en Estados Unidos con filósofos de la ciencia de todas las orientaciones. Aunque no es imposible: por ejemplo, he encontrado compañeros de discusión muy interesantes en el grupo de Marisa Dalla Chiara y Federico Laudisa en Florencia, e interlocutores extraordinarios, como Michel Petitot y Michel Bitbol, en la École Polytechnique de París.

El pensamiento científico es la base de la modernidad. Creo que el pensamiento filosófico europeo de este siglo no debería mantenerse tan alejado de él. Pero el abismo que separa la cultura humanística y la cultura científica dista mucho aún de ser superado. Por ejemplo, en la filosofía del conocimiento continental, la idea difundida de que la verdad es un concepto puramente interno al discurso y no fundamentado difícilmente puede sintonizar con el discurso científico.

Esta desconfianza mutua entre el mundo humanístico y el mundo de las ciencias también pesa en la imagen que la sociedad se forma de la ciencia, imagen que se ha degradado en los últimos decenios. Por un lado, la ciencia todavía es considerada como un conjunto de «verdades establecidas», que se consulta según las necesidades, o se venera, o bien como un conjunto de fórmulas técnicas para resolver problemas. Por el otro, y a la inversa, la ciencia también es denunciada como negación de los valores espirituales, es decir, una amenaza para nuestra sociedad, o como el fundamento del dominio tecnológico, el lugar de la arrogancia miope de los expertos, o incluso una fuente de horrores a lo Frankenstein, cuando lo que se destaca son los aspectos terroríficos de ciertas innovaciones.

La consecuencia de esas visiones deformadas de la ciencia es la disminución de su aura y el avance del pensamiento irracional. Esas visiones están alimentando incluso una especie de alianza entre multiculturalismo y anticientifismo que podría instalarse en nuestra sociedad. En varios estados de Estados Unidos (Kansas «rural», pero también California), los profesores no pueden hablar en la escuela de la teoría de la evolución. Las leyes que prohíben enseñar las teorías de Darwin se justifican por el relativismo cultural: sabemos que la ciencia se equivoca, por tanto, un conocimiento científico no es más defendible que una verdad bíblica. Preguntado recientemente sobre este tema, un candidato a la presidencia de Estados Unidos declaró que «no sabía» si los seres vivos tienen realmente antepasados comunes. ¿Es que sabemos si es la Tierra la que gira alrededor del Sol o el Sol alrededor de la Tierra? Afortunadamente, en Europa no hemos llegado a estos extremos, pero las tensiones son fuertes. Hace poco el gobierno italiano intentó introducir el creacionismo en la escuela.

Los avances de la medicina han empezado a dar miedo, como en el siglo XVII, y con el mismo tipo de errores. Se piensa, por ejemplo, que el alma y la identidad están en el ADN y, por tanto, que un niño clonado ¡poseería un doble del alma del original! Esto me recuerda la época en que el doctor Christian Barnard hacía los primeros trasplantes de corazón, en los años sesenta. Los periódicos y los sacerdotes, horrorizados, se preguntaban si el Señor A, con el corazón del Señor B, seguiría amando a su mujer o amaría a la viuda del Señor B (puesto que, como todo el mundo sabe, es el corazón el que ama). Sin embargo, los trasplantes de corazón no se interrumpieron por estas estupideces. En cambio, hoy en día el animismo y el miedo se imponen a menudo. Asusta pensar que muy pronto se puedan declarar diabólicos los

gemelos auténticos, puesto que comparten el mismo ADN y son uno el clon del otro...

Las inversiones en la ciencia fundamental, la ciencia que crea «cultura», que busca el conocimiento básico, están en caída libre. La sociedad pide cada vez menos a los científicos que vayan en busca «de conocimiento». Les pide que desarrollen productos para vender; y armas.

Deseo de todo corazón que esta confusión no acabe poniendo en peligro nuestra confianza en la fuerza del pensamiento racional. Las representaciones caricaturescas de la ciencia están vinculadas sin duda a errores que se han cometido, pero designan una forma de ciencia que hace tiempo que mostró sus límites y que ya no se practica. Los entusiasmos por la «ciencia triunfante» del positivismo decimonónico han desaparecido, especialmente tras la caída del newtonismo y la posterior reflexión dolorosa sobre la limitada duración de la vida de las teorías científicas.

Por otra parte, la reacción primero antitecnológica, luego también anticientífica de una determinada filosofía continental, no ha hecho más que acentuar la estúpida separación entre las «dos culturas» (humanística y científica): una separación que no nos permite ver la complejidad y la riqueza de nuestra comprensión del mundo.

La ciencia es una cosa muy distinta de todas estas caricaturas.

¿Qué es la ciencia?

Es posible que el mayor descubrimiento científico del siglo xx sea simplemente el hecho de que la ciencia «se equivoca», de que las representaciones del mundo desarrolladas por la ciencia pueden ser, en un sentido preciso y verificable, falsas. Y, por tanto, que puede haber muchas interpretaciones del mundo y que ninguna puede ser considerada verdadera más que hasta cierto punto.

A principios del siglo xx se vio que el esquema conceptual newtoniano, que era *el* modelo absoluto de la ciencia eficaz, no siempre funciona. Ha de ser revisado en profundidad para comprender los fenómenos físicos nuevos a los que se accede. Este sorprendente descubrimiento provocó una oleada de estupor que se propagó por toda la comunidad científica. Su efecto en la filosofía de la ciencia fue aún mayor. Podríamos decir que buena parte de la

filosofía de la ciencia pasó el último medio siglo intentando acomodarse a este descubrimiento.

Creo, no obstante, que es precisamente el descubrimiento de los límites de las representaciones científicas del mundo lo que revela la fuerza del pensamiento científico, que no reside en los «experimentos», ni en las «matemáticas», ni en un «método», sino en la capacidad de cuestionarse constantemente, que es propia del pensamiento científico: dudar de sus propias afirmaciones, no tener miedo a poner a prueba sus propias convicciones, ni siquiera las más ciertas. El núcleo de la ciencia es el cambio.

El proceso científico avanza continuamente en busca del mejor modo de pensar el mundo. Es una exploración de las formas de pensamiento, y de ahí obtiene su eficacia. Eso no significa que las respuestas científicas siempre sean correctas, sino que en los ámbitos en que se aplica el pensamiento científico las respuestas científicas son, por definición, las mejores que se han obtenido hasta ese momento.

Esta imagen de una ciencia fluida, en permanente revolución, suspendida siempre entre el conocimiento y la duda, dedicada continuamente a la investigación e insatisfecha siempre de sus resultados, es muy distinta de la que nos dejó el siglo XIX. No obstante, la antigua imagen de una ciencia arrogante sigue todavía muy presente en la sociedad y es, en realidad, el verdadero blanco de las críticas del anticientificismo y del relativismo cultural, aunque de hecho la que mejor conoce el carácter relativo de nuestra cultura es la propia ciencia. La ciencia está en constante evolución precisamente porque es muy consciente de los límites de todo conocimiento. Su fuerza reside en la falta de confianza en sus propios conceptos: nunca cree del todo en sus resultados y sabe que solo podemos pensar el mundo partiendo de la frágil base de nuestros conocimientos, aunque esta base esté en constante transformación.

Podríamos comparar cualquier ciencia con un proyecto cartográfico. El mapa no es el territorio, pero es la mejor representación que de él puede hacerse, sobre todo si queremos viajar a ese territorio. Con unos pocos signos se codifica la mayor parte posible del mundo. Unos pocos símbolos, y cobra sentido. Pero no es más que un mapa. Y hay otros mapas.

De modo que lo que me parece realmente interesante no son tanto las representaciones científicas del mundo como su continua *evolución*. No son tanto las maravillas descubiertas por la ciencia como la magia de una forma de pensamiento capaz de poner en duda sus propias afirmaciones y de

enseñarnos, decenio tras decenio, a cambiar nuestra manera de mirar el mundo.

Historia del espacio: Anaximandro

La transformación de las nociones de espacio y de tiempo, de la que hablo en este libro, es un ejemplo entre otros de la evolución continua que es propia de la ciencia. Esas dos nociones, fundamentales en nuestra visión del mundo, fueron modificadas recientemente por el pensamiento de Einstein y siguen estando hoy en proceso de cambio.

Esta movilidad no es específica de la ciencia moderna. Einstein no fue el primero que cambió profundamente nuestra visión del mundo. Muchos lo hicieron antes que él, y de forma más revolucionaria aún: Copérnico y Galileo convencieron a la humanidad de que la Tierra viaja a 30 km por segundo, Faraday y Maxwell llenaron el espacio de campos eléctricos y magnéticos, y Darwin nos enseñó que compartimos ancestros con las mariquitas...

Pero el proceso viene de mucho más lejos. Creo que no se puede entender realmente lo que significan los cambios modernos en la noción de espacio si no se resitúan en su contexto histórico. Permítanme, pues, que les cuente el comienzo de esta hermosa historia.

Todas las civilizaciones antiguas creyeron que el mundo estaba estructurado en dos partes: la Tierra abajo y el Cielo arriba. Esta concepción del mundo la compartían los egipcios, los israelitas, los mesopotámicos, los chinos y las primeras civilizaciones del valle del Indo, así como los mayas, los aztecas o los indios de América del Norte. Es decir, para toda la humanidad antigua, el espacio tenía naturalmente un «arriba» y un «abajo». Las cosas caen hacia abajo. Y debajo de la Tierra hay más tierra, o tal vez una enorme tortuga, o unos grandes pilares, en cualquier caso, algo sólido sobre lo que la tierra se apoya, que la sostiene y le impide caer también hacia «abajo».

Sabemos el nombre del primer hombre que transformó esta visión del mundo: Anaximandro, científico y filósofo que vivió seis siglos antes de Cristo en Mileto, ciudad griega en la costa de la actual Turquía. Él fue quien sugirió, y llegó a imponer, una nueva interpretación de lo que vemos: el cielo no está solamente por encima de la tierra, sino que continúa alrededor de ella también por debajo: la Tierra es un «gran guijarro» que flota en el espacio.

¿Cómo llegó a comprender que la Tierra es un guijarro de tamaño finito que flota en el espacio? Si se observa con atención, los indicios eran

numerosos. Pensemos, por ejemplo, en el Sol, en la Luna y en todas las estrellas que se ponen por el oeste y salen por el este. ¿No indican claramente que han de pasar *por debajo* de la Tierra para completar su círculo? ¿Y que, por tanto, ha de haber espacio vacío por debajo? Anaximandro aplicó la misma intuición que nos dice que cuando vemos que alguien desaparece por detrás de una casa y reaparece por el otro lado, esto significa que ha de haber un paso por detrás de la casa. También hay otros indicios, más sutiles, pero muy convincentes. Por ejemplo, la sombra de la Tierra que se proyecta sobre la luna durante un eclipse demuestra que la Tierra es un objeto finito.

Pensaréis, por tanto, que era fácil. ¿Lo era realmente? No, no lo era, ya que millones de hombres durante siglos de civilización jamás pensaron en ello. ¿Por qué era tan difícil llegar a esta idea? Porque revolucionaba profundamente la imagen del mundo.

Los hombres permanecen fijados a sus ideas, y no las cambian fácilmente. Creen que lo saben todo. Las ideas nuevas inspiran temor porque desconciertan. ¿Acaso no es perturbadora la idea de que la Tierra no se apoya en nada? ¿Por qué no se cae? Esa pregunta se le formuló de inmediato a Anaximandro, y sabemos cuál fue su respuesta: porque las cosas no caen «hacia abajo», las cosas caen «hacia la Tierra»; y, por tanto, la Tierra no tiene ninguna dirección especial hacia la que caer, a no ser ella misma. Una vez más, según nuestra comprensión actual del mundo, la respuesta de Anaximandro es correcta. Pero es desconcertante: Anaximandro replantea completamente el marco conceptual de nuestra comprensión del espacio, de la Tierra y de la gravedad que hace caer los cuerpos. Sobre la base de las observaciones, y para explicarlas mejor, propone un nuevo mapa del mundo, un mapa conceptual diferente, una idea radicalmente nueva del modo en que está organizado el espacio. Ya no un espacio escindido en dos, un «arriba» y un «abajo», sino un único espacio hecho de cielo en cuyo interior flota la Tierra y en el que las cosas caen hacia la Tierra. Es una imagen del mundo más general y mejor que la anterior.

Anaximandro escribió un libro en el que propone esta idea, entre otras, y presenta todos los argumentos para defenderla. La idea se fue asentando, lentamente. En la generación siguiente, en la escuela pitagórica de las ciudades griegas del sur de Italia, ya se habla abiertamente de una Tierra esférica rodeada por los cielos. El texto más antiguo que conocemos que habla de la Tierra esférica es el *Fedón* de Platón, en el que esta idea se presenta como creíble pero no completamente demostrada. En la generación siguiente, algo más de un siglo después de Anaximandro, Aristóteles da por

sentada la idea de una Tierra esférica que flota en el espacio, y hace una lista de los muchos argumentos, muy convincentes, que la sostienen. Así que, en unas pocas generaciones, la audaz idea de Anaximandro se ha convertido en opinión corriente. A partir del mundo griego, esta idea se extenderá por toda la humanidad.

Anaximandro es, en mi opinión, no solo uno de los primeros científicos que conocemos, sino también uno de los más grandes que han existido. Su capacidad de imaginar que la Tierra flota en el espacio sin caer es tal vez la primera y sin duda una de las más bellas ilustraciones de lo que es la Ciencia: la posibilidad de cambiar radicalmente nuestra visión del mundo, sobre la base de las observaciones y del pensamiento racional. La capacidad de cuestionar ideas y representaciones adquiridas, y de encontrar otras, más eficaces. Esa es la gran fuerza visionaria de la ciencia que siempre me ha fascinado.

Cuando una nueva visión del mundo está bien comprobada, se convierte lentamente en la nueva cultura. El hecho de que la estructura del espacio esté modificada por la proximidad de un cuerpo macizo será algún día un conocimiento común, y la idea de un espacio rígido y homogéneo será risible, como es ingenuo pensar que la Tierra ha de apoyarse en algo para no caer.

En este proceso de reconstrucción continua, la propia sustancia del mundo, o más bien nuestra manera de concebirla, se modifica continuamente. También en este sentido Anaximandro inicia esta fabulosa aventura: introduce, para explicar todos los fenómenos, una entidad que denomina *apeiron* (traducido por algunos como «lo que no tiene distinciones, indefinido», y por otros como «lo ilimitado»). Es el primer objeto teórico concebido como «uno de los pilares» de la realidad, el abuelo de los átomos, de las partículas elementales, de los campos físicos, del espacio-tiempo curvo, de los quarks, de las cuerdas y de los bucles, mediante los que reformulamos hoy lo que vemos.

Ese proceso revolucionario, que desemboca en visiones del mundo radicalmente diferentes, no fue, por tanto, inventado por Einstein; es característico de la *Gran Ciencia*. Lo que hizo Einstein «solamente» fue, forzando un poco las cosas, despertar la ciencia fundamental de un cierto letargo en el que la había sumergido el inmenso éxito de las teorías de Newton.

Historia del espacio: ¿una relación o una entidad?

Contrariamente a lo que podría creerse, la representación del espacio que dominó desde Aristóteles hasta Newton es la de un espacio estructurado y formado por los propios objetos del mundo. El espacio era como el orden en el que los objetos se tocan, o también la manera en que se relacionan. Por tanto, en la tradición científica y filosófica occidental, la idea newtoniana de un espacio *absoluto* que puede existir independientemente de cualquier objeto no era para nada el punto de vista dominante sobre la naturaleza del espacio.

Para imponer la noción de un espacio-caja como entidad independiente, Newton tuvo que enfrentarse a una resistencia feroz por parte del pensamiento de su época. Esta oposición no procedía tanto de los sabios de la vieja escuela aristotélica como de los defensores de la *Scientia Nova*, la Nueva Ciencia, que creían en la reciente revolución copernicana y consideraban a René Descartes su maestro. La representación cartesiana del espacio era muy diferente a la de Newton, y se situaba en la línea de la tradición occidental que parte de Aristóteles. Para Descartes, como para Aristóteles, no existe una entidad «espacio». No existe, por ejemplo, espacio vacío; solamente hay objetos (guijarros, muros, sillas, aire, agua...). Esos objetos pueden estar en una relación de contigüidad (pueden tocarse o no), y esta relación de contigüidad determina un orden entre los objetos, orden que constituye el espacio. Por ejemplo, Aristóteles define la posición de un objeto como la frontera interna del conjunto de los otros objetos que lo rodean, una especie de posición «en hueco» definida por los vecinos inmediatos, de modo que la posición A es definida por B y viceversa. Igualmente, para Descartes el movimiento de un objeto A se define como el paso de la contigüidad de un objeto B a la contigüidad de otro objeto C. Por tanto, es imposible decir de un objeto solo si está en movimiento o no.

Para Newton, en cambio, todos los objetos se sitúan en el espacio, que tiene una estructura propia y que nada tiene que ver con los objetos que pueden encontrarse en él. Un objeto se mueve cuando pasa de un punto del espacio a otro punto del espacio. En la primera interpretación del espacio, la aristotélica-cartesiana, el espacio no es una entidad, es una *relación entre cosas*. En la segunda, newtoniana, el espacio es una *entidad* que existe y tiene una estructura, incluso en ausencia de objetos.

¿Elegir entre estas dos posibilidades es un problema científico, o es un problema puramente filosófico? Yo diría que es un problema científico, pero no en el sentido en que la ciencia daría la visión «correcta» del espacio. El papel de la ciencia es saber cuál de estas dos visiones del espacio será la mejor para pensar el mundo de la manera más eficaz. Este es el auténtico

meollo del problema de la verdad de los enunciados científicos. Newton aborda el problema de la naturaleza del espacio en su obra más importante, los *Principia Mathematica*, cuya primera parte está dedicada a la naturaleza del espacio. Su punto fuerte, la razón por la que su solución acaba siendo la mejor, es que construye una forma de describir el mundo, basada en su visión del espacio, que funciona increíblemente bien.

Acuérdense de la ecuación que aprendieron en el instituto: $F = ma$, en la que F es la fuerza, m la masa y a la aceleración. Esta ecuación es la base de toda la mecánica newtoniana. Ahora bien, necesitamos poder medir la aceleración, y la aceleración es una medida del movimiento. ¿Movimiento en relación a qué? En relación al espacio absoluto en que se encuentra. Para que la teoría funcione, *es necesario* poder decir si un objeto acelera o no, de forma absoluta. Para Newton, la aceleración se entiende en relación con la entidad «espacio», mientras que para un aristotélico-cartesiano esta noción de aceleración absoluta no tiene sentido, porque no puede decirse que un objeto se mueve si no se compara con otro objeto.

La construcción de Newton funciona tan bien que seguimos utilizándola hoy en día para construir casas y puentes, para hacer volar los aviones y en muchas otras aplicaciones tecnológicas. Pero la vieja idea aristotélica y cartesiana del espacio como relación, y las críticas a la idea del espacio como entidad, siguieron siendo defendidas por pensadores como Leibniz, Berkeley y Mach. A través de ellos esta idea llegó a Einstein, que la convirtió en la base de su teoría de la relatividad general.

El debate filosófico en torno al concepto de espacio como entidad o como relación se ha mantenido a través de los siglos, proporcionando a científicos como Newton y Einstein temas de reflexión y de inspiración, y todavía no ha agotado todo su potencial. Creo que hoy es preciso reflexionar de nuevo sobre este problema si se quieren comprender las propiedades cuánticas de la gravedad. Probablemente no se construirá una teoría completa de la gravedad cuántica hasta que se abandone del todo la idea newtoniana del espacio como entidad. Solo existe el campo gravitatorio, al igual que los otros campos. En gravedad cuántica, los bucles son los cuantos del campo gravitatorio y sus relaciones constituyen el espacio.

¿Qué sabemos realmente?

La base misma de la ciencia es el pensamiento crítico: la firme conciencia de que nuestras visiones del mundo siempre son parciales, subjetivas, imprecisas, provincianas y simplistas. Hay que seguir queriendo comprender mejor, abrir horizontes, encontrar un punto de vista más amplio. Esto no es ni cómodo ni natural ya que, en cierto modo, somos prisioneros de nuestros pensamientos. Es imposible por definición abandonar nuestro pensamiento. No se puede mirar desde fuera y modificarlo. Hay que trabajar desde el interior de nuestros errores para descubrir *dónde* estamos a punto de equivocarnos. Esto significa reconstruir el barco mientras se sigue navegando. Esto es la ciencia: un esfuerzo continuo por reconstruir y reestructurar nuestro pensamiento mientras estamos pensando.

No hay ninguna otra forma de conocimiento humano que permita hacer *predicciones* tan fiables como las de la ciencia. Si los astrónomos nos dicen que el próximo mes habrá un eclipse de Sol, podemos estar seguros de que tienen razón. Por supuesto, podría caer sobre nosotros una estrella de neutrones a una velocidad próxima a la de la luz y arrancar la Luna, pero es bastante improbable.

No obstante, todas las teorías científicas han sido sustituidas un día u otro por teorías mejores, incluso las más eficaces. La eficacia del modelo de Ptolomeo, por ejemplo, es sorprendente: todavía podemos abrir hoy su libro, escrito hace diecinueve siglos, y utilizar sus tablas y su geometría para predecir con exactitud la posición de Venus en el cielo el próximo mes. Sin embargo, sabemos que el mundo no está bien descrito por los «epiciclos» y «deferentes» utilizados por Ptolomeo. Más impresionante es aún el éxito de la teoría de Newton, que nuestros ingenieros utilizan a diario para construir puentes y aviones, pese a que ha resultado ser falsa en un nivel de detalle más profundo.

¿Podemos vivir con esta imperfección? ¿De qué conocimiento podemos fiarnos? ¿Alguna vez podremos estar seguros de que lo que nos dice la ciencia sobre el mundo es cierto? Cabe esperar que algún día se formule una teoría «final», exacta hasta en el último detalle, pero este sueño me parece baladí, o en todo caso prematuro: la extensión de cuanto todavía ignoramos es inmensa y los problemas planteados en física teórica son tan fundamentales que no creo que el final del camino esté muy cerca.

Si es así, ¿por qué hay que creer en la ciencia? No porque nos diga cosas indudablemente ciertas, sino porque por el momento sus respuestas son las mejores que tenemos. Y esto casi por definición: si aparece una respuesta mejor, esta respuesta será la «científica». Por ejemplo, la física de Newton era

la ciencia hasta el siglo xx. Pero cuando Einstein formuló una teoría mejor, en la que el espacio es curvo, el tiempo variable y la luz constituida por fotones, el abandono del «newtonismo» no se consideró el final de la ciencia, sino todo lo contrario: Einstein es un científico extraordinario.

Si la medicina tibetana demuestra que determinada planta, o una cierta técnica, o una cierta conducta del médico contribuyen a la curación, y si la eficacia de esta cura está verificada empíricamente, la cura tibetana se convierte en parte integrante de la medicina «científica». Muchos de nuestros medicamentos no pertenecen a la cultura occidental y se han convertido en terapias reconocidas.

El pensamiento científico es consciente de nuestra ignorancia. Diría incluso que el pensamiento científico es la conciencia misma de la extensión de nuestra ignorancia y de la naturaleza dinámica del conocimiento. Lo que nos hace avanzar es la duda y no la certeza. Es, sin duda, la herencia profunda de Descartes. Debemos confiar en la ciencia no porque nos ofrezca certezas, sino porque no las tiene.

Yo no sé si el espacio es «realmente» curvo, como pretende la relatividad general, pero no conozco hasta hoy otra forma más eficaz de entender el mundo físico que pensar que el espacio es curvo. Las otras visiones del mundo no explican tan bien la complejidad del mundo.

Ahora bien, la obsesión de la ciencia por cuestionar todas las verdades no conduce al escepticismo, ni al nihilismo, ni siquiera a un relativismo radical, sino solo a la conciencia de que el conocimiento evoluciona. La precariedad de la verdad no implica que no podamos ponernos de acuerdo. De hecho, la ciencia es el proceso mismo por el que conseguimos ponernos de acuerdo.

Por otra parte, esta aventura no se basa únicamente en la racionalidad, que es necesaria para formalizar el proceso, porque al principio todos los grandes descubrimientos fueron intuiciones. La ciencia nace de un sueño, se afirma cuando demuestra ser más eficaz que otros sueños dominantes y se convierte en el sueño común de todo el mundo.

Cuando yo era pequeño y hacía preguntas sobre las nubes, mi padre me las describía como barcos navegando en el cielo. Más tarde, me explicó que de hecho eran gotitas de agua que estaban en suspensión en el aire y esto cambió completamente mi manera de ver las nubes. Pero, ¿podemos decir que una visión borró la otra? No, yo diría que coexisten y se enriquecen mutuamente. Ver las nubes como un meteorólogo no impide ver las nubes como un poeta.

La ciencia está construida como un refinamiento progresivo del modo de buscar respuestas, pero no existiría sin esta insaciable manía de hacer preguntas, manía que encontramos ya, y sobre todo, en los niños de cuatro años. La ciencia no empieza en la universidad, sino que tiene sus raíces en esta curiosidad y en este apetito de conocimiento que nos caracteriza desde la más tierna infancia. A los cuatro años no nos da miedo abandonar nuestros prejuicios y cambiar nuestra visión del mundo, y aprendemos muy rápidamente.

La sociedad entera puede seguir aprendiendo, en la medida en que no tema abandonar sus numerosos prejuicios. Esta búsqueda es una aventura que continúa. Es tal vez la mayor aventura de la historia de la humanidad.

5. LOS BUCLES: GRANOS DE ESPACIO, REDES DE ESPÍN, COSMOLOGÍA ESENCIAL Y CALOR DE LOS AGUJEROS NEGROS

Durante los años de mi estancia en Estados Unidos, regresaba a Italia todos los veranos, y a menudo me acompañaban Abhay Ashtekar o Lee Smolin, o ambos. Se habían convertido en mis amigos y en mis principales colaboradores. Aprovechábamos las vacaciones en Italia para trabajar juntos.

Buena parte de nuestra teoría la desarrollamos durante estas estancias en Italia. Por ejemplo, fue en Trento donde los tres empezamos a comprender cómo describir el espacio macroscópico juntando un gran número de bucles. Fue también en Trento donde comprendimos, después de un cálculo que no conducía a nada, que el tamaño de los bucles no era infinitesimal, como creíamos al principio: su tamaño era muy pequeño pero finito.

También había un aspecto extraño de la teoría que no conseguíamos comprender: desde un punto de vista matemático, se constataba que estos bucles que constituyen el espacio presentaban *intersecciones*: en determinados puntos se metían uno en el otro. Es decir, si retomamos la [figura 3](#) que muestra los anillos entremezclados, hemos de imaginar que cada anillo tiene puntos de intersección con sus vecinos, como si la red estuviera tensa y todos los puntos de contacto, soldados. Los anillos ya no están entremezclados, sino conectados. No conseguíamos comprender lo que representaban esas intersecciones.

Redes de espín

A mediados de los años ochenta, aprovechando una estancia de Lee en Verona, trabajamos con la ayuda de un método de cálculo bastante clásico. En mecánica cuántica, como ya hemos visto, muchas magnitudes están «cuantificadas». Eso significa que no pueden adoptar cualquier valor, sino tan

solo ciertos valores discontinuos. Para calcular los valores que una magnitud física puede adoptar, se utiliza una técnica llamada «cálculo del espectro del operador». En nuestro caso, nos interesaba una magnitud física concreta: el *volumen*.

¿Qué es un volumen? Es la medida de una cantidad de espacio. El volumen de una habitación es la cantidad de espacio contenido en esta habitación. Pero como el espacio se ha convertido en el campo gravitatorio, el volumen mide el campo gravitatorio. Y como nosotros estábamos batallando con una teoría cuántica, había muchas posibilidades de que el volumen tuviera valores discontinuos y, por tanto, de que pudiera haber «granos» de volumen. Los cálculos resultaron muy complicados, pero logramos resolverlos gracias, sobre todo, a la ayuda de un gran matemático inglés, Roger Penrose. Decidimos ir a consultarlo cuando nos dimos cuenta de que nuestros cálculos conducían a objetos matemáticos que Penrose había estudiado veinte años antes, y que había denominado *spin networks*, o «redes de espín».

El resultado del cálculo fue que el volumen es en efecto una variable no continua y, por tanto, el espacio está constituido por cuantos de volumen, o de granos de espacio. Pues bien, descubrimos que esos cuantos de espacio se encuentran exactamente en las intersecciones de los bucles. Las misteriosas intersecciones que aparecían en nuestros cálculos eran precisamente los granos de espacio que buscábamos.

Estos resultados cambiaron nuestra representación inicial. Las intersecciones adquirieron más importancia que las líneas de Faraday del campo. Dejamos de hablar de un conjunto de bucles con puntos de intersección para hablar más bien de un conjunto de puntos, las famosas intersecciones, unidos entre sí por enlaces, es decir, por una *red*. Los bucles siguen existiendo: unen varios puntos mediante una línea de Faraday que se cierra sobre sí misma. Cada punto pertenece asimismo a otro bucle, incluso a varios, lo que implica que los bucles pueden compartir no solo puntos sino también segmentos entre dos puntos. De modo que en un mismo enlace que va de una intersección a otra se puede encontrar más de una línea de Faraday. El número de líneas de Faraday superpuestas en el mismo enlace es un número entero que se define como el *espín* del enlace. (Por razones históricas complejas, se utiliza de hecho la mitad de ese número, que es por tanto un número semientero, como $1/2$, 1 , $3/2$, 2 , $5/2$...). Cada enlace está caracterizado por su espín, es decir, por el número de bucles diferentes que pasan por ese enlace. De ahí el nombre de *red de espín*.

La imagen que resulta del espacio cuántico es sorprendente: los nudos de red de espín son los granos de espacio, y los enlaces que unen los puntos representan las relaciones espaciales entre ellos. En efecto, el espín de cada enlace proporciona el número de bucles que lo atraviesa, y por tanto describe qué granos se encuentran en contacto con otros granos. Esto es lo que ilustra la figura 5.

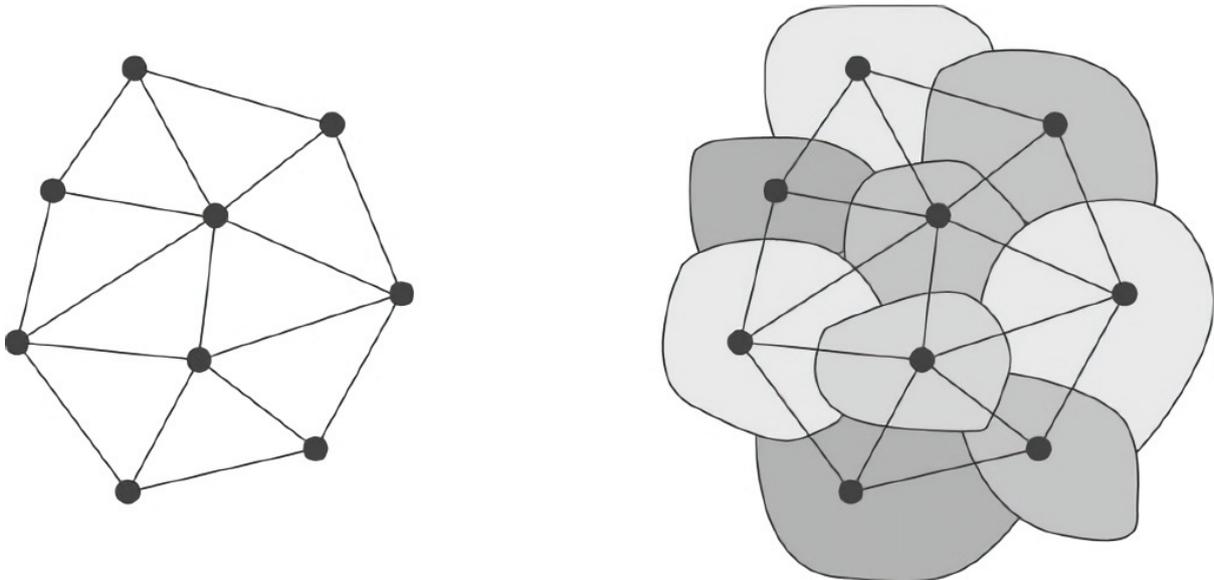


Figura 5. Una «red de espín» (a la izquierda) está formada por líneas de Faraday del campo gravitatorio; cada segmento de línea pertenece a uno o varios bucles que unen varios puntos; los puntos de intersección son los «nudos» de red, que representan «granos de espacio» (simbolizados por esferas en la figura de la derecha). Los enlaces de red representan las relaciones de proximidad entre los granos de espacio.

Como ya hemos dicho, el cálculo del «espectro de volumen» proporciona los valores de volumen que pueden ser observados, es decir, algunos valores concretos. De igual modo el cálculo puede hacerse para el tamaño de una superficie. En ese caso, se calcula el «espectro del aire», y nos encontramos con un conjunto de números que representan los resultados posibles cuando se mide una superficie. Así pues, la teoría de la gravedad de bucles predice también que si medimos una superficie de forma exacta, no podemos obtener cualquier número, sino tan solo uno de los números que están en la lista obtenida mediante el cálculo del espectro.

Cuando decimos que el *volumen* de una caja es de un metro cúbico, en realidad no contamos cuántos granos de espacio, o mejor, qué cantidad de «cuantos de campo gravitatorio» hay en la caja (cuántas intersecciones de red de espín). Evidentemente, los cuantos son muy pequeños. En una caja de un metro cúbico, la cantidad total de cuantos estaría representada por un número de un centenar de cifras.

Del mismo modo, cuando decimos que la *superficie* de una página de este libro es de doscientos centímetros cuadrados, en realidad contamos el número de enlaces de red, o incluso el número de bucles elementales que atraviesan la página. En una página de este libro la cantidad estaría representada por un número de aproximadamente setenta cifras, como muestra la figura 6. (Por supuesto, no se trata de una página real, sino de una superficie teórica que tendría el mismo tamaño que esta página, ya que los bucles son mucho más pequeños que el grosor del papel y, por tanto, no podrían contarse).

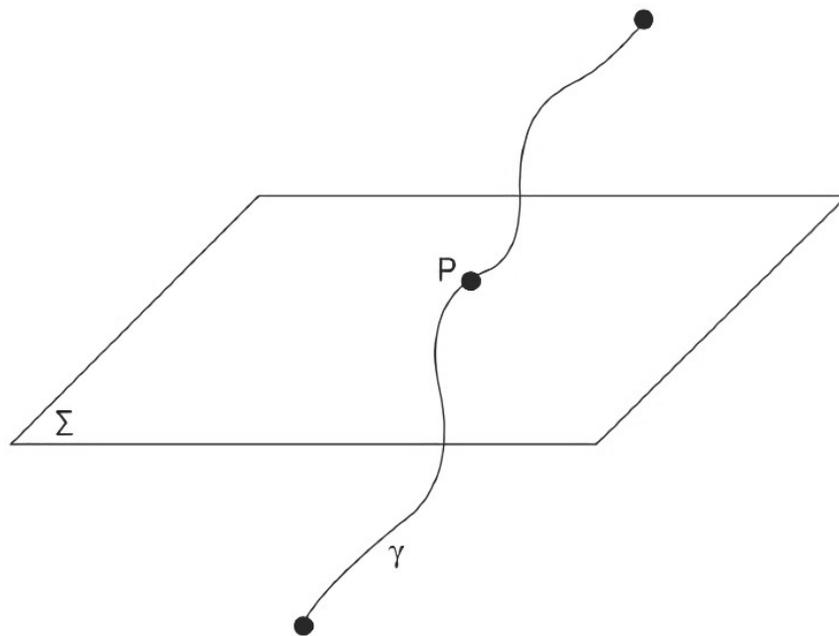


Figura 6. Una superficie Σ está atravesada por un bucle (del que se ha dibujado tan solo un segmento) en el punto P . La medida de la superficie está determinada por el número de bucles que la atraviesan. Una superficie equivalente a una página de este libro está atravesada aproximadamente por 10^{70} bucles, es decir, un número de setenta cifras.

La tecnología actual no es suficiente para verificar estas predicciones, ya que la precisión de las mediciones de superficie o de volumen dista mucho aún de alcanzar el tamaño de un bucle. Pero es muy importante que la teoría proporcione predicciones precisas y, al menos en principio, verificables. Si no lo hiciera, no sería una teoría científica. Hasta hoy, la teoría de la gravedad de bucles es la única teoría de gravedad cuántica que proporciona un conjunto de predicciones no ambiguas y articuladas, susceptibles de ser verificadas.

Las redes de espín proporcionan una descripción matemáticamente precisa de la estructura cuántica del espacio. Para ser más exactos, puesto que estamos hablando de mecánica cuántica —y, por tanto, de probabilidades— la teoría está formulada en términos de nubes de probabilidades asociadas a estas redes de espín. Hay que imaginar que esas redes de espín que

constituyen el mundo fluctúan, vibran y se agitan, algo así como los puntos negros y blancos de una televisión analógica sin antena, y las matemáticas de la teoría describen la agitación de las redes de espín.

Un aspecto bastante sorprendente de esta historia es que Roger Penrose «inventó» las redes de espín simplemente con la imaginación, cuando intentaba describir a qué podría parecerse el espacio cuántico. Y resulta que nosotros encontramos esas mismas redes de espín como una consecuencia de la teoría de la relatividad general y de la mecánica cuántica combinadas.

John Wheeler

En los años sesenta, la idea intuitiva de un espacio que ya no es continuo a escala muy pequeña la había sugerido John Wheeler, uno de los dos autores de la ecuación de Wheeler-DeWitt. La teoría de los bucles es una concreción matemática precisa de esta idea. De ahí que sintiera una gran emoción el día en que John Wheeler, un gran hombre y veterano de la gravedad cuántica, me envió unas palabras llenas de afecto y entusiasmo ante nuestros resultados y me invitó a Princeton a exponer nuestra teoría.

John Wheeler colaboró de joven con Niels Bohr, uno de los gigantes de la física de principios del siglo xx. Participó con él en el nacimiento de la mecánica cuántica, luego se dedicó a la física nuclear y se lo considera uno de los creadores de los primeros modelos de núcleo atómico. Pasó los años de la guerra en Estados Unidos, donde desempeñó un papel fundamental en los trágicos acontecimientos vinculados con la bomba atómica. Tras una discusión en su despacho, tomó la decisión de escribir a Roosevelt para incitarlo a fabricar la bomba atómica, porque los científicos temían que los alemanes la fabricaran primero, temor que luego resultó ser infundado. Después de la guerra, Wheeler se dedicó a estudiar la gravitación y se convirtió en el principal colaborador de Einstein. Él fue quien introdujo el término tan popular de «agujero negro». Expuso una serie de intuiciones e ideas muy importantes que son la base de la investigación en gravedad cuántica. Sugirió que el espacio-tiempo, en la escala más pequeña, podría ser una especie de espuma fluctuante (una espuma de espacio-tiempo). Junto con Bryce De Witt, otro gran científico norteamericano, formuló la famosa ecuación que se convertiría en la ecuación fundamental de la gravedad cuántica. Uno de sus alumnos fue Richard Feynman, tal vez el físico más

importante de la segunda mitad del siglo xx. En resumen, fue uno de los grandes protagonistas en el desarrollo de la física moderna. ¡Ya pueden imaginar cuál fue mi emoción al recibir su carta!

A mi llegada, Wheeler se reunió conmigo en el *bed and breakfast* donde me alojaba. Desayunamos juntos y luego me acompañó a dar un largo paseo por el campus. Le expliqué los resultados de nuestros cálculos mientras él iba desgranando sus extraordinarios recuerdos: Bohr, la bomba atómica... «Fíjate, Carlo, me decía, cuando Einstein llegó aquí por primera vez huyendo de la Alemania nazi, fui a buscarlo a primera hora, como acabo de hacer contigo, y paseamos por estos mismos lugares...». ¿Por qué la cercanía, aunque sea indirecta, de los hombres que más huella han dejado en nuestro pensamiento nos provoca tanta emoción? Son hombres como los otros, por supuesto, con sus debilidades y su humanidad, pero la fascinación que sentimos por sus ideas les otorga un aura incomparable. Han abierto caminos que tenemos el privilegio de seguir, y por eso despiertan admiración, gratitud y afecto.

John me hablaba en voz baja. Era mayor y estaba débil, pero mantenía intacta su energía interior. Defendía su participación en la terrible aventura de la bomba atómica, frente a mis objeciones de pacifista radical. Cuando le enseñé mi dibujo de la estructura del espacio (figura 3), sonrió como un niño y fue a buscar una imagen muy similar que había dibujado mucho tiempo atrás, y que aparece en uno de sus libros (figura 7). Estaba muy contento de haber hallado un resultado teórico a una idea que había tenido de forma intuitiva muchos años antes.

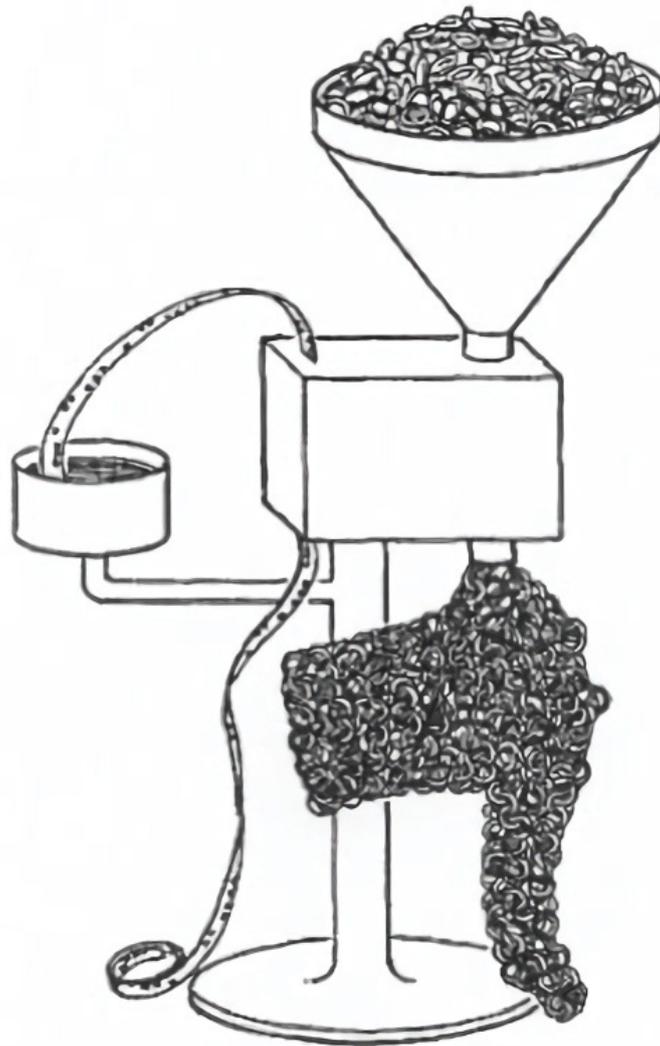


Figura 7. La imagen de los «Diez mil anillos que pueden formar el espacio-tiempo» en el libro *Gravitation de Misner, Thorne y Wheeler*, publicado en 1970, que John Wheeler me enseñó en Princeton con ocasión de mi visita.

¿Probar la teoría?

Hoy en día la gravedad cuántica de bucles la estudian centenares de investigadores en todo el mundo, que la han desarrollado en distintas direcciones. La teoría tiene aplicaciones en diferentes campos, por ejemplo en cosmología, para estudiar el *Big Bang* —los primeros momentos del Universo—, o para estudiar las propiedades de los agujeros negros, especialmente sus propiedades térmicas.

La aplicación de la teoría de los bucles a los agujeros negros coincide con un extraño descubrimiento realizado en los años setenta por Stephen Hawking. Hawking es famoso porque ha conseguido continuar su trabajo

científico pese a que una grave enfermedad lo obliga a vivir en una silla de ruedas y a comunicarse por medio de un ordenador que controla con la mano. Uno de sus resultados más importantes es el descubrimiento teórico de que los agujeros negros son «calientes», es decir, que se comportan exactamente como cuerpos calientes: emiten una radiación térmica con una cierta temperatura. El fenómeno es conocido con el nombre de «radiación Hawking», o también «evaporación» del agujero negro, porque al emitir calor el agujero negro pierde energía y «se evapora» lentamente.

Los objetos están calientes porque sus constituyentes microscópicos están en movimiento. Un pedazo de hierro caliente es un pedazo de hierro cuyos átomos vibran rápidamente en torno a sus posiciones de equilibrio. La superficie de un agujero negro no está compuesta de materia. Por tanto, si un agujero negro está caliente, ¿qué son esos «átomos» o constituyentes elementales que pueden vibrar?

La teoría de los bucles proporciona una respuesta. Los «átomos» elementales de un agujero negro, que vibran y son responsables de su temperatura, son precisamente los bucles individuales que están en la superficie del agujero negro. Utilizando la teoría, podemos comprender y derivar el resultado de Hawking en términos de «vibraciones» microscópicas de los bucles. Es un test importante de la coherencia de la teoría de los bucles, pero no es todavía un verdadero test experimental.

Durante mucho tiempo se creyó que cualquier posibilidad de verificación experimental real estaría fuera de nuestro alcance. Recientemente, se han estudiado varias ideas que permitirían probar la teoría observando consecuencias indirectas de la granularidad del espacio.

Una idea que se ha contemplado, aunque sin éxito, es la siguiente. Si la estructura del espacio es granular, esto podría tener un efecto sobre la propagación de la luz. Rayos de colores diferentes que atraviesan el espacio granular deberían en principio desplazarse a velocidades ligeramente diferentes (como en un cristal: la luz está dispersada y el rojo avanza un poco más rápido que el azul, por tanto, se ve llegar la imagen roja un poco antes que la imagen azul). El efecto es minúsculo, pero se acumula a lo largo del trayecto. Se debería poder detectar en los rayos de luz que proceden de galaxias muy lejanas. Para poder probar estas predicciones, se requiere una gran precisión de medida.

Pero el verdadero problema es que la teoría de los bucles no produce ese efecto, pues violaría una simetría de la naturaleza llamada la «simetría de Lorentz local». Mediante unos cálculos precisos se ha demostrado que la

violación de la simetría no puede producirse en la teoría. Paralelamente, determinadas mediciones de los rayos cósmicos han confirmado que no había quiebra de la simetría en la propagación de la luz: incluso en la luz que llega de muy lejos, los distintos colores llegan juntos. Ese resultado apoya la teoría, pero es un poco decepcionante: la teoría prevé que no se ve nada y, en efecto, no se ve nada.

Por otra parte, es interesante que estas mediciones puedan verificar escalas muy pequeñas: si hubiera un efecto, se habría podido observar. El episodio nos permite pensar que pronto se podrán detectar efectos generados por fenómenos que se producen a la escala de Planck, es decir, a la escala de los bucles elementales del campo de gravedad cuántica.

Las consecuencias de la teoría que tienen más posibilidades de llegar a ser observables están en otro ámbito: la cosmología. La aplicación de la teoría de los bucles a la cosmología ha tenido un desarrollo enorme estos últimos años y es uno de los ámbitos de investigación más activos.

La cosmología esencial

La cosmología ha tenido un desarrollo impresionante en los últimos treinta años. Actualmente, poseemos un conocimiento considerable, y creciente, de la historia del Universo y de su expansión. En 1998 descubrimos que el Universo no solo está en expansión, sino que esta expansión es acelerada: el Universo aumenta de tamaño cada vez más rápido. Esta expansión acelerada se presenta a menudo como el efecto de una misteriosa «energía oscura», aunque ese lenguaje no es muy serio. La aceleración ya está descrita en la teoría clásica de Einstein, si se considera un término que aparece en las ecuaciones denominado «constante cosmológica». Einstein había demostrado la presencia de este término pero no se tomó en serio (ni siquiera por él mismo) hasta el descubrimiento de la expansión acelerada. De modo que el futuro del Universo parece presentarse, según el estado actual de nuestro conocimiento, como un alejamiento continuo cada vez más rápido de las galaxias entre sí.

En el otro extremo de la historia, el misterio es más impenetrable: en el principio. Y es ahí donde la gravedad cuántica de bucles puede aportar más luz. Justo después del *Big Bang*, el Universo era muy pequeño; podemos decir que estaba compuesto por un número reducido de granos de espacio. Esos granos originales podrían haber dejado huellas en la estructura actual del

Universo, especialmente en el fondo de radiación cósmica («la radiación fósil») que ha sido medida con gran precisión, y que está a punto de proporcionarnos mucha información sobre la estructura del Universo. Es imposible establecer un modelo de la evolución inicial del Universo por un espacio continuo, como puede hacerse, por aproximación, cuando el Universo es grande. Hay que tomar en consideración la granularidad de una manera explícita, y para hacerlo se pueden utilizar las ecuaciones de la teoría de los bucles. De este modo se obtiene una descripción de los instantes inmediatamente posteriores al *Big Bang*, e incluso del propio *Big Bang*.

Las ecuaciones de la relatividad general de Einstein ya no funcionan cuando se llega al *Big Bang*, porque generan una serie de valores infinitos que hacen que el cálculo sea imposible. Sin una teoría de la gravedad cuántica no puede decirse nada seguro sobre lo que ocurrió en el momento del *Big Bang*. Si se intenta calcular lo que ocurrió en el Universo en el momento del *Big Bang* con la vieja ecuación de Wheeler-DeWitt, aparecen las mismas incoherencias que en la teoría clásica de Einstein: la evolución en el tiempo se detiene en el *Big Bang* y las ecuaciones pierden sentido. En cambio, las ecuaciones que derivan de la teoría de los bucles siguen funcionando para el *Big Bang*. La razón es precisamente la granularidad del espacio. El Universo se contrae cada vez más a medida que nos acercamos al *Big Bang*, pero no puede hacerse «infinitamente» pequeño, porque en la teoría de los bucles no es posible alcanzar volúmenes arbitrariamente pequeños: el espacio está cuantificado. Existe un volumen mínimo que ya no puede reducirse.

Estas ideas fueron ampliamente desarrolladas por Abhay Ashtekar y su grupo de investigación en Estados Unidos. Las primeras conclusiones, sorprendentes, de este campo de investigación parecen indicar que el *Big Bang* no es un auténtico principio, sino que podría verse como un «rebote» que sigue a una fase en que el Universo estaba contraído. Este resultado es sólido: se ha obtenido de diferentes maneras. Desde el punto de vista teórico, el gran avance consiste en haber producido ecuaciones que siguen funcionando en las proximidades del *Big Bang* y ya no dan como resultado cantidades infinitas absurdas, de modo que es posible calcular lo que ocurre hasta el *Big Bang* e incluso más allá.

Desde el punto de vista de la observación, este resultado es importante, ya que las ecuaciones de la evolución del Universo modificadas por la gravedad cuántica son ligeramente diferentes a las de la teoría clásica utilizadas por los cosmólogos. Esta diferencia podría tener efectos detectables en la observación del fondo difuso cosmológico. Satélites como *cobe*, *wmap* y *Planck* han

medido con una precisión cada vez mayor las características de esta débil luz difusa presente en el espacio. La teoría de los bucles permite calcular los efectos mensurables que la gravedad cuántica debería tener sobre la traza del fondo difuso cosmológico. El espectro de potencia de las fluctuaciones del fondo difuso para las grandes longitudes de onda debería alejarse de lo que se ha calculado en el marco de la teoría clásica. De momento, las diferencias previstas son todavía inferiores a los márgenes de error de los instrumentos de medición, pero llegará el día —cabe esperarlo— en que se podrán diferenciar los dos cálculos mediante la observación.

En marzo de 2014, un equipo de astrónomos que trabajaban en un radiotelescopio instalado en la Antártida anunció la detección de ondas gravitacionales primordiales a través de la polarización de la luz en el fondo difuso cosmológico. Si se confirma, es un resultado notable para la cosmología, que permite por primera vez observar directamente las huellas de fenómenos que se produjeron casi inmediatamente después del *Big Bang*, mucho antes de la emisión de la radiación fósil. Este descubrimiento constituye un primer paso hacia una manifestación de los efectos de la gravedad cuántica.

No hay todavía en estas observaciones una medición que pueda ser explotada directamente por la teoría, pero estamos cerca de ello. Medimos ya los efectos de fenómenos muy cercanos a la era de Planck: ese ámbito, que parecía inaccesible hace treinta años, está ahora casi a nuestro alcance. Además, creemos haber detectado correlaciones en las variaciones del fondo difuso, generadas al comienzo de la vida del Universo por fluctuaciones cuánticas del campo gravitatorio. Por tanto, existía gravedad cuántica para empezar. El espacio-tiempo vibra, y vibra de manera cuántica.

El trabajo de cálculo que une las ecuaciones básicas de la teoría a observaciones eventuales es difícil. Implica aproximaciones, un conocimiento de la gravedad cuántica y de la cosmología que muy poca gente posee, y mucha intuición. Los mejores científicos del ámbito que trabajan en este sentido se encuentran en Francia. Pienso sobre todo en Aurélien Barrau y su grupo, en Grenoble, que hoy en día ocupa uno de los primeros puestos mundiales en este esfuerzo de investigación.

Desde el punto de vista conceptual, me causa perplejidad la posibilidad de interpretar los resultados teóricos sobre el *Big Bang* simplemente como un Universo «antes» del *Big Bang*. Los resultados son correctos, y las observaciones que podrían derivarse son concretas, pero el significado físico preciso de estos descubrimientos es aún, a mi entender, un misterio que hay

que aclarar. ¿Realmente tiene sentido preguntarse lo que ocurrió «antes» del *Big Bang*?

Lo que nos dice la teoría es que en las proximidades del *Big Bang*, el Universo se encuentra en un estado cuántico tal que el tiempo y el espacio no están bien definidos, del mismo modo que en la mecánica cuántica la trayectoria de una partícula no está bien definida. Pero si el espacio y el tiempo no están definidos en esta zona del espacio-tiempo, ¿qué significa la expresión «antes»?

Por último, ¿qué es el tiempo en una teoría en que el propio espacio-tiempo se vuelve probabilístico?

La cosmología y las estrellas de Planck

Uno de los desarrollos más recientes trata de la aplicación de la gravedad cuántica al estudio de lo que ocurre en el centro de los agujeros negros. Si las nuevas perspectivas que esto aporta son confirmadas algún día por la observación, la concepción usual de agujero negro y de su destino cambia profundamente.

Según la teoría clásica, la vida de una estrella masiva acaba cuando ha agotado su combustible por una explosión de sus capas externas y un hundimiento de sus capas internas hacia el estado llamado «agujero negro». La parte externa del agujero negro está bien descrita por la teoría clásica, y las observaciones astronómicas confirman esas descripciones. Pero ¿qué ocurre en el interior de la estrella?

Según la teoría clásica, la materia de la estrella cae hacia el centro del agujero negro y se condensa cada vez más hacia un volumen nulo, de densidad infinita y de temperatura infinita, hasta desaparecer. Todo esto es imposible, por supuesto, en el plano físico. La prestidigitación no es una hipótesis científica. Antes de llegar a esto, debe intervenir la gravedad cuántica.

Con la teoría de los bucles, la descripción de un agujero negro cambia de aspecto, ya que el carácter cuantificado del campo de gravedad (los granos de espacio-tiempo) no permite que la implosión de la estrella continúe hasta el infinito. Llega un momento en que la materia se vuelve tan densa que la gravedad cuántica ejerce un efecto de repulsión. Por debajo de un determinado tamaño, las propiedades cuánticas del espacio-tiempo se imponen sobre las propiedades macroscópicas, y la repulsión ejercida (la

presión gravitatoria cuántica) se opone al colapso de la estrella hasta alcanzar un estado de densidad límite, la densidad de Planck.

En los restos de estrellas físicamente observables, que no se han convertido en agujeros negros porque no tenían masa suficiente, la densidad de materia más grande que se conoce es la de las estrellas de neutrones. Si el sol colapsara hasta convertirse en una estrella de neutrones, su tamaño se reduciría a un kilómetro de diámetro aproximadamente, es decir, una compresión extraordinaria. Pero si el colapso prosiguiera hasta alcanzar la densidad de Planck, su tamaño no sería mayor que el de un átomo. Y no se puede avanzar más. La densidad de Planck es un límite. Las estrellas que alcanzan este estado se denominan «estrellas de Planck».

Si la densidad de un agujero negro no es infinita, sino conocida, se puede calcular su tamaño y también la evolución de los fenómenos que en él se desarrollan. Dicho de otro modo, por primera vez se dirige una mirada (teórica) a un objeto hasta entonces opaco.

¿Qué ocurre? La presión gravitatoria actúa como un muro contra el que rebota la materia de la estrella. El fenómeno es muy rápido, como una bala que rebota contra el muro. Por tanto, la estrella, justo después de haber colapsado, explota.

Si es así, ¿cómo es posible que los agujeros negros que conocemos puedan existir desde hace miles o millones de años, teniendo en cuenta el comportamiento de la materia que evoluciona en su entorno? Aquí entra en juego el extraño comportamiento del tiempo descrito por la relatividad general. El paso del tiempo en un punto del Universo está regido por el campo de gravedad que domina en este punto. Los relojes en la Tierra funcionan a menor velocidad que los relojes a bordo de los satélites, porque el campo de gravedad es más potente en Tierra que en órbita. En el sol, un reloj disminuiría la velocidad de forma notable con relación al tiempo de un observador externo. El astronauta que se arriesgara a pisar la superficie del Sol no observaría ninguna diferencia, su reloj funciona con normalidad, mientras que el de su amigo que permanece en la Tierra parece haberse acelerado, y cuando el primero regresa a su casa, los dos amigos constatan que existe una diferencia real.

Imagínense ahora en qué se convierte el tiempo en el interior de un agujero negro... Cuanto más colapsa la materia, más aumenta el campo de gravedad, y más disminuye la velocidad del tiempo en relación con el exterior, hasta el punto de que casi parece detenerse. Mientras nosotros vivimos siglos y milenios, el reloj interno del agujero negro apenas avanza un

milisegundo. Por tanto, el proceso que a nosotros nos parece que dura millones de años, apenas dura un segundo en el reloj del agujero negro. La implosión y la explosión se encadenan de forma inmediata, pero se despliegan como una película a cámara lenta ante nuestros ojos que están fuera del campo de gravedad intensa.

La duración de este proceso no es la misma en todos los agujeros negros, depende de la masa inicial (es proporcional a la masa elevada al cubo), puesto que cuanto más fuerte es el campo de gravedad (afectado por la masa), más disminuye la velocidad del tiempo.

Para ser más exactos, la explosión no se produce exactamente después del colapso, ya que la estrella es demasiado masiva para poder franquear su propio horizonte (impide a sí misma salir del «agujero» que ha causado en el campo gravitatorio). Primero ha de perder una parte de su masa por «evaporación», el proceso descubierto por Stephen Hawking. Al cabo de un tiempo de evaporación (muy largo para nosotros, muy corto a la escala del agujero negro), el residuo de la estrella de Planck se convierte en un objeto macroscópico (menos pequeño y menos denso) y el horizonte desaparece. En ese estadio, la presión gravitatoria cuántica puede desintegrar lo que queda de la estrella y pulverizarla.

Esta descripción nueva transforma el agujero negro en un objeto como cualquier otro, que evoluciona después a otro estado. Lo importante es que nos da una posibilidad de verificar la teoría por medio de observaciones. La explosión del agujero negro dejará una marca específica. Las propiedades calculadas del rebote muestran que la materia de la estrella ha de transformarse en radiación de tipo gamma, e incluso se puede precisar de qué longitud de onda. Puesto que los primeros agujeros negros se formaron al comienzo del Universo, actualmente tienen una edad de 13,7 mil millones de años (de *nuestros* años). Mediante la teoría de los bucles, se puede calcular cuál es la masa de un agujero negro que explota al cabo de 13,7 mil millones de años: 10^{12} kg. Y para un agujero negro de esta masa se calcula que la longitud de onda de la radiación emitida en la explosión será de unos 10^{-14} cm, es decir, una escala de energía perfectamente detectable por los telescopios gamma como el Fermi-LAT, por ejemplo.

En los últimos treinta años se han descubierto en el cielo, procedentes de todas las direcciones, emisiones repentinas, intensas y breves, de radiación gamma, que se denominan «sobresaltos gamma». Son de diferentes tipos y han sido objeto de numerosas investigaciones. Parece ya seguro que algunos están vinculados al final de la vida de estrellas muy masivas y a su

transformación en agujeros negros. Falta estudiar la posibilidad de que otros estén vinculados al final de la vida del propio agujero negro. Si así fuera, muy pronto podríamos encontrar huellas de explosiones de agujeros negros, es decir, observar y medir un efecto directo de un hecho gobernado por la gravedad cuántica. La idea es audaz y podría ser un fracaso, por ejemplo si el Universo primitivo no formó suficientes agujeros negros para que se produzcan explosiones hoy. Pero la búsqueda de señales ha empezado y esperamos los resultados.

En esta nueva visión del agujero negro, la noción de tiempo se vuelve vertiginosa, puesto que tenemos ante nuestros ojos una especie de trituradora del tiempo, o de «bomba del tiempo», capaz de atrapar una partícula al comienzo del Universo y escupirla 13 mil millones de años más tarde, cuando en su reloj personal solo han transcurrido unos segundos. ¿Cómo aceptar la idea de que pueda haber tiempos tan diferentes en el Universo?

6. EL TIEMPO NO EXISTE

Tras ese largo rodeo por el espacio, ha llegado el momento de hablar concretamente del tiempo. Diez años antes de descubrir la teoría de la relatividad general, Einstein había llegado a la conclusión de que tiempo y espacio no son dos entidades separadas, sino más bien dos aspectos de una misma entidad. A este descubrimiento se le da el nombre de relatividad especial o restringida. Estamos acostumbrados a pensar que dos hechos (la llegada de Cristóbal Colón a América y la muerte de John Lennon, por ejemplo) siempre están ordenados en el tiempo, es decir, que uno ocurre *antes* y el otro ocurre *después*. Estamos acostumbrados a pensar que el tiempo es algo universal, y que por esta razón tiene sentido preguntarse qué ocurre *en este momento preciso* en otro punto del Universo. Pero no es así.

La relatividad del tiempo

El ejemplo más claro de la relatividad del tiempo es la llamada paradoja de los gemelos, aunque no tiene nada de paradójico. Si uno de los gemelos viaja a gran velocidad alejándose del otro, y luego regresa, cuando se encuentren tendrán edades diferentes: el que nunca ha cambiado de velocidad será el más viejo (lo mismo que ocurre entre dos caminos que conectan las mismas ciudades, el que nunca gira siempre es el más corto). No se trata de una paradoja, es una consecuencia de la forma en que está estructurado el mundo: el tiempo no es un «continente» absoluto en el que los objetos evolucionan; el tiempo es propio de cada objeto y depende de su movimiento. El único aspecto paradójico es que no estamos acostumbrados a observar estas diferencias, porque son demasiado pequeñas a nuestra escala. Nos parecen antiintuitivas; sin embargo, las cosas son así. Se han realizado experimentos concretos (no con gemelos, sino con relojes idénticos muy precisos a bordo de aviones rápidos) y cada vez se ha comprobado que el mundo funciona

exactamente como lo entendió Einstein: los dos relojes marcan horas distintas cuando se reúnen de nuevo.

En Francia está bastante extendida la creencia de que el padre de estas ideas es Poincaré y no Einstein, pero no es así. La aportación de Poincaré en ocasiones se ha subestimado, pero de la lectura de los artículos originales se desprende claramente que fue Einstein y no Poincaré quien comprendió el hecho fundamental de la diferencia entre dos relojes idénticos cuando están en movimiento.

Diez años después de la relatividad especial, Einstein hizo más variable aún el tiempo con la teoría de la relatividad general. Demostró que un campo gravitatorio fuerte (cerca de la Tierra, o del Sol, por ejemplo) hace que los relojes funcionen más lentamente. Esta es la razón de las correcciones relativistas que hay que introducir en el funcionamiento del GPS, que está basado en la medición muy precisa del tiempo que tardan las señales en recorrer la distancia entre la Tierra y los satélites en órbita. Estos se desplazan a gran velocidad, y están más lejos del campo de gravedad terrestre que nosotros, de modo que su tiempo no es el mismo que el tiempo en tierra: transcurre un poco más deprisa. Si no se corrigen los cálculos de las distancias teniendo en cuenta esta diferencia, el resultado será falso.

A modo de anécdota, cuando se desarrolló el sistema GPS, a los generales del ejército estadounidense responsables del proyecto les costaba mucho creer en la relatividad del tiempo. Los físicos les habían dicho que los relojes que iban a bordo de los satélites irían más rápido que los relojes en tierra, pero... ¿se los podía tomar en serio? ¿Un militar puede creer realmente que el tiempo transcurre más rápido o más lento? Para mayor seguridad, el ejército estadounidense probó el sistema con dos opciones: una sin corrección y la otra con corrección. ¿Y qué creen que ocurrió? Es un ejemplo muy ilustrativo del hecho de que la relatividad general es una teoría *establecida*. No creer en sus predicciones es una idiotez.

Volvamos a los principios. Cuando dos hechos suceden en lugares suficientemente alejados, no tiene sentido, en general, decir cuál de los dos sucede *antes*. Y tampoco tiene sentido preguntarse qué ocurre *en este momento preciso* en la galaxia de Andrómeda, por ejemplo. La razón es que el tiempo no transcurre del mismo modo en todas partes. Nosotros tenemos nuestro tiempo, y la galaxia de Andrómeda tiene el suyo, y en términos generales estos dos tiempos no pueden relacionarse.

Lo único que puede hacerse es intercambiar señales (por ejemplo, electromagnéticas: luminosas, radio u otras), pero tardarán millones de años

en hacer el viaje de ida y vuelta entre Andrómeda y la Tierra. Imaginen un extraterrestre que nos envía una señal desde Andrómeda. Nosotros recibimos este mensaje *hoy* y respondemos de inmediato. Diremos que el momento en que el extraterrestre ha enviado la señal se sitúa *antes* de hoy, y que el momento en que recibirá la respuesta será *después* de hoy. Pero durante los millones de años que transcurren entre el envío de la señal por parte del extraterrestre y su recepción de nuestra respuesta, no existe un momento concreto en Andrómeda que corresponda a este «hoy» en la Tierra. Los dos lugares están desconectados desde el punto de vista físico y temporal.

Lo que quiero decir es que no debemos pensar en el tiempo como si existiera un reloj cósmico que marcara el ritmo de la vida del Universo. Debemos pensar en él como en una condición local: cada objeto en el Universo posee su propio tiempo. Es algo así como la meteorología, que además utiliza la misma palabra; hay dos maneras sensatas de preguntarse: ¿qué tiempo hace?

La manera en que se articulan los tiempos de cada uno cuando hay objetos que se encuentran o intercambian señales puede describirse con precisión. Para hacerlo, en la descripción matemática del mundo, no se habla de «tiempo» y de «espacio», sino de una unión de ambos llamada «espacio-tiempo». El espacio-tiempo es un poco como el conjunto de todos los tiempos y de todos los lugares.

Todo esto lo sabemos desde hace más de un siglo (el texto de Einstein se publicó en 1905), pero no es demasiado sorprendente que todavía no sea un conocimiento extendido y conocido por todo el mundo. Ha ocurrido lo mismo con muchas revoluciones conceptuales. Fijémonos en la revolución copernicana: mucho tiempo después del descubrimiento de Copérnico, mucha gente seguía convencida de que el Sol giraba alrededor de la Tierra y no a la inversa. Pero la investigación prosigue y no espera que en cada etapa la siga todo el mundo.

La ausencia del tiempo

La novedad que aporta hoy la gravedad cuántica es la idea de que el espacio no existe. Solo existe el campo gravitatorio que, como ya he dicho, está formado por nubes de probabilidad de granos unidos en red. Combinando esta idea con la relatividad especial, se llega a la conclusión de que la no existencia del espacio implica también la no existencia del tiempo, puesto que

espacio y tiempo están íntimamente vinculados. Es exactamente lo que se observa en la propia formulación de la gravedad cuántica: la variable t no aparece en la ecuación de Wheeler-DeWitt, ni en ninguna otra parte de la estructura básica de la teoría.

El tiempo no existe. Habrá que aprender a pensar el mundo en términos no temporales, aunque intuitivamente resulte difícil.

Pero ¿qué significa realmente esta idea de que el tiempo no existe?

En física clásica, la que se enseña en la escuela, el tiempo interviene en casi todas las ecuaciones. Es la variable simbolizada por la letra t . Las ecuaciones nos dicen cómo cambian las cosas con el paso del tiempo y nos permiten predecir lo que ocurrirá en un momento futuro si conocemos lo que ha ocurrido en el pasado. Para ser más precisos, medimos ciertas variables, por ejemplo la posición A de un objeto, la amplitud B de un péndulo que oscila, la temperatura C de un cuerpo, etc., y las ecuaciones nos dicen cómo evolucionan las variables A , B y C . Es decir, expresan las funciones $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, etc., que describen el cambio de esas variables con el paso del tiempo (t). Pero ¿de dónde procede esa forma de expresar las cosas?

Galileo fue el primero en comprender que el movimiento de los objetos sobre la Tierra podía ser descrito mediante ecuaciones expresadas en función de la variable tiempo $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ y en escribir esas ecuaciones. Su trabajo era la prolongación de una reflexión que empezó con las ideas de Copérnico. Galileo fue el primero en tomarse muy en serio la idea de que la Tierra se mueve y en deducir de ella una intuición genial: la astronomía había demostrado que existen leyes exactas que rigen el movimiento de los cuerpos en el cielo, y permiten predecir la posición de los astros con precisión. Galileo comprendió que si la Tierra era un planeta como los otros y, por tanto, una parte del cielo, debía haber también leyes que rigieran el movimiento de los cuerpos sobre la Tierra. Las buscó y las encontró.

La primera ley física terrestre enunciada por Galileo describe cómo caen las cosas. Es muy sencilla: la distancia x recorrida por un objeto que cae es proporcional al cuadrado del tiempo « t ». Es decir: en un tiempo doble, un objeto recorre una distancia cuatro veces mayor. Esto se escribe generalmente como $x = (1/2) at^2$, donde a es un número (la aceleración) y el « $1/2$ » está ahí por razones históricas. Galileo descubrió esta ley, empíricamente, estudiando cómo se mueve una bola cuando desciende por un plano inclinado. Para descubrir y confirmar esta ley, Galileo necesitaba dos medidas: la de la posición x de la bola en el plano inclinado, y la del tiempo t . Por tanto,

necesitaba sobre todo un instrumento para medir el tiempo t , es decir, un reloj.

Pero en la época de Galileo no había relojes precisos. Él mismo, en su juventud, había descubierto un modo de fabricar uno. Había observado que las oscilaciones de un *péndulo*, cualquiera que sea su amplitud, tienen siempre la misma duración. De modo que podía medirse el tiempo contando simplemente las oscilaciones de un péndulo. La variable « t », que representa el tiempo, se mide por el número de oscilaciones del péndulo.

Cuenta la leyenda que tuvo esa intuición en la catedral de Pisa, mientras observaba las lentas oscilaciones de una lámpara suspendida del techo, que todavía se conserva (la anécdota es falsa porque la lámpara fue colgada mucho tiempo después, pero es una bonita historia). Galileo observaba los movimientos de la lámpara durante el servicio religioso, que no debía interesarle demasiado, y contó el número de pulsaciones de su muñeca. Contando en distintos momentos, con oscilaciones cada vez menores, descubrió que en cada oscilación tenía siempre el mismo número de pulsaciones. De ello concluyó que todas las oscilaciones tenían la misma duración.

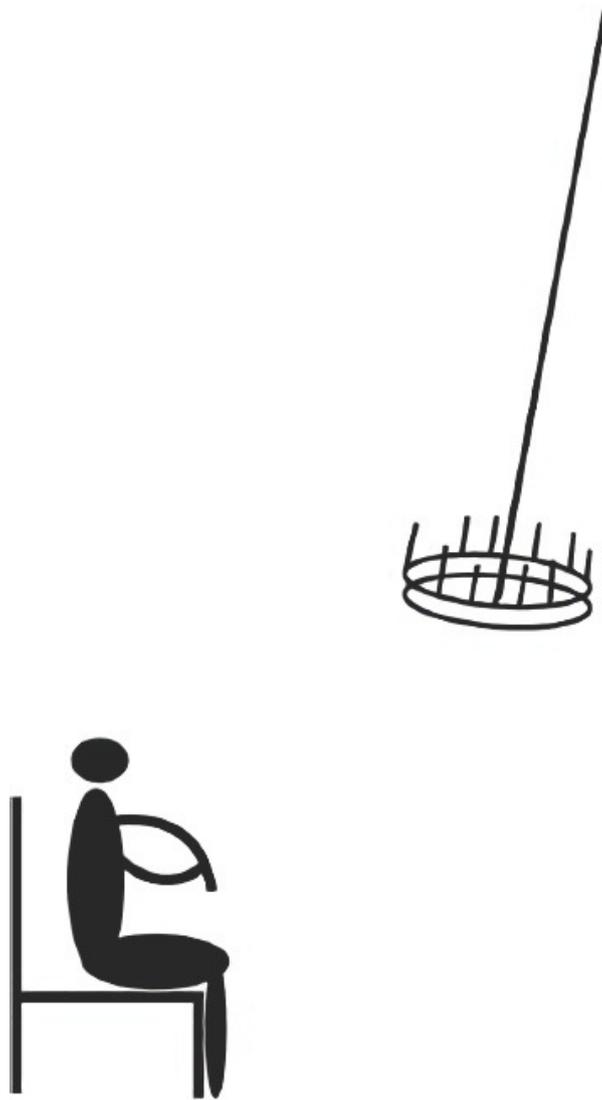


Figura 8. Galileo descubre que las oscilaciones de un péndulo siempre tienen la misma duración contando los latidos de su pulso durante las lentas oscilaciones de la lámpara de la catedral de Pisa.

A posteriori, la historia parece bonita, pero si reflexionamos más atentamente, vemos que planea sobre ella una duda que es la base misma del problema del tiempo. ¿Cómo podía saber Galileo que sus latidos tenían todos la misma duración? Unos años más tarde, los médicos empezaron a tomar el pulso de sus pacientes utilizando relojes cuyo mecanismo no era más que un péndulo rápido (de eje corto). De modo que se utiliza el pulso para estar seguro de que el péndulo es regular, y luego otro péndulo para estar seguro de que el pulso es regular. ¿No es esto un círculo vicioso? ¿Qué significa?

Esto significa que nosotros *nunca* medimos el tiempo, lo que hacemos siempre es medir variables físicas A , B , C ... (oscilaciones, latidos, curso del Sol, y muchas otras cosas), y comparamos siempre una variable con otra. Por tanto, medimos las funciones $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, etc. Esto sigue siendo cierto hoy. Los relojes más sofisticados están basados en fenómenos cíclicos (la

oscilación energética de un átomo de cesio, por ejemplo) cuyo número de ciclos se cuenta. Estos son mucho más estables y precisos que la oscilación de un péndulo, o que el ritmo cardíaco, pero se trata siempre de fenómenos naturales que se «cuentan», y no del tiempo mismo.

Y, sin embargo, es útil imaginar que existe una variable t , el «verdadero tiempo», a la que no podemos acceder, pero que se encuentra detrás de todas las cosas. Escribimos todas las ecuaciones para las variables físicas en función de esa t inobservable. Esas ecuaciones nos dicen cómo cambian las cosas en función de t (cuánto tiempo duran las oscilaciones, cuánto tiempo dura cada latido del corazón). Pero en realidad en primer lugar hemos calculado cómo cambian las variables en relación una con otra (cuántos latidos del corazón en una oscilación, cuántas oscilaciones en una rotación de la Tierra) y hemos elegido la variable más estable como referencia para medir las otras: la segunda siempre ha sido definida como un cierto número de ciclos de un determinado fenómeno natural. Luego, comparando las predicciones que permite este método con lo que observamos, concluimos que ese esquema complicado es el bueno, y especialmente que es útil utilizar la variable t , aunque nunca podamos medirla directamente. En otras palabras, la existencia de una variable «tiempo» universal es más un postulado que el resultado de una observación.

Newton comprendió que este método permite unificar muchas cosas, y formalizó e instituyó esta forma de hacer ciencia. Afirma explícitamente que no podemos medir el «verdadero» tiempo t , pero que si suponemos que existe, esto nos permite construir un esquema extraordinariamente eficaz para comprender y describir la naturaleza.

Volvamos ahora a nuestra época, a la gravedad cuántica, y al significado de esta afirmación: «el tiempo no existe». Esto quiere decir simplemente que el esquema de Newton ya no funciona cuando hablamos de lo infinitamente pequeño. Era una estrategia excelente, pero solo es válida para los fenómenos macroscópicos, es decir, a nuestra escala.

Si pretendemos obtener una visión del mundo más amplia, si queremos describirlo también en regímenes que nos resultan menos familiares, hay que abandonar ese esquema, porque ya no sirve. La idea de un tiempo t que transcurre por sí mismo, y en relación al cual evoluciona todo lo demás, ya no corresponde a la realidad. El mundo microscópico no puede ser descrito mediante ecuaciones de evolución en el tiempo t .

Cuando un estudiante de física se enfrenta por primera vez a esta idea, empieza a sentirse aterrorizado. ¿Ecuaciones sin la variable tiempo? ¿Cómo

podremos describir la evolución del sistema? Poco a poco irá comprendiendo que la variable tiempo realmente ya no es necesaria. En vez de referirlo todo al «tiempo», abstracto y absoluto, que era una «cosa» inventada por Newton, se puede describir cada variable en función del estado de las otras variables.

Para llegar a formular esto, debemos limitarnos a listas de variables A , B , C ... que observamos *efectivamente*, y establecer relaciones entre estas variables, es decir, ecuaciones para las funciones $A(B)$, $B(C)$, $C(A)$... que observamos, y no para las funciones $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, que *no* observamos. En el ejemplo, no tendremos el pulso y el péndulo que evolucionan en el tiempo, sino tan solo ecuaciones que nos dicen cómo uno y otro evolucionan en relación con el otro. Qué valores de uno son compatibles con qué valores del otro.

El tiempo, igual que el espacio, se convierte en una noción relacional, que solo expresa una relación entre los distintos estados de las cosas.

Se trata de un cambio simple, pero desde el punto de vista conceptual es un paso de gigante. Debemos aprender a pensar el mundo no como algo que evoluciona en el tiempo, sino de otra manera. En el nivel fundamental, no hay tiempo. Para cada objeto, el tiempo es la manera en que cambia en relación con otros objetos.

La nueva imagen del mundo que está a punto de configurarse en la física básica es la de un mundo sin espacio ni tiempo. El espacio y el tiempo habituales simplemente *desaparecerán* del marco de la física básica, del mismo modo que la noción de «centro del Universo» desapareció de la imagen científica del mundo. Lo que queda en su lugar son relaciones entre objetos.

Esto representa una revolución radical en la estructura de nuestro pensamiento, pero creo que hay que aceptar concebir el mundo de una forma nueva, sin introducir el factor tiempo en las ecuaciones.

No obstante, ni siquiera mis amigos más cercanos están todos de acuerdo. Hace poco, mi colega y amigo de siempre, Lee Smolin, me dio a leer el más sorprendente elogio del tiempo.

Lee Smolin rehabilita el tiempo

En su última obra titulada *Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe*, mi hermano desde los comienzos de la teoría de los bucles adopta una postura rotunda a favor de una concepción absolutista del

tiempo. Esta afirmación, y la detallada argumentación que la acompaña, pueden sorprender al lector cándido en la medida en que se trata «simplemente» de defender la idea de que el tiempo existe y de que constituye un dato fundamental del mundo. Espontáneamente, nadie pensaría que hay que probar la existencia del tiempo, ¿acaso no es como preguntarnos si la Tierra existe?

No obstante, hoy en día la física nos obliga a cuestionar la existencia del tiempo, especialmente en el marco de la gravedad cuántica. Lee Smolin expone en este libro las razones por las que cree que tenemos más posibilidades de comprender el mundo si mantenemos el estatus del tiempo.

Su argumentación implica un cuestionamiento considerable: poner en tela de juicio la ambición que forma parte del ideal de la física teórica desde hace siglos: la búsqueda de leyes universales y «atemporales». Para entender la naturaleza, dice Smolin, no es un buen camino atribuirle leyes absolutas, verdaderas en todo tiempo y lugar. Las leyes de la física estarían sujetas a cambio, como el resto de la naturaleza y, por tanto, también evolucionarían. Las leyes que se creían universales e intemporales deberían ser reducidas al estatus de leyes históricas. Toda ley de la naturaleza, incluidas las más fundamentales de la física teórica, se convierte así en una regla provisional, que tiene vigencia en un cierto momento, y durante un cierto tiempo. No se trata tan solo de una respuesta a la idea de describir las leyes de la naturaleza prescindiendo de la variable tiempo. Se trata de transformar la física en un capítulo de la historia.

Esta postura radical no es convencional, aunque no es la primera vez que aparece. Es el resultado sobre todo de una interacción entre Lee Smolin y Roberto Unger, un filósofo que ha trabajado en ámbitos como la teoría social, política, jurídica y económica, más bien lejos de la filosofía de la ciencia. La tesis básica hunde sus raíces en el pragmatismo norteamericano clásico: la formula explícitamente Pierce. El argumento principal que sustenta la tesis, según Unger y Smolin, procede de la cosmología contemporánea. A lo largo del siglo xx, se demostró que el Universo observable tiene una historia, desde el *Big Bang* hasta nuestros días. A lo largo de su evolución, ha pasado por diferentes fases, y las leyes de la biología, de la química, de la física clásica, de la física de partículas y de la gravedad no han podido «reinar» y aplicarse en todas las épocas. Se requieren ciertas condiciones para que una «ley» entre en vigor, y esas condiciones solo se reúnen en un momento determinado. No había química y, por tanto, «leyes» de la química cuando no había átomos: estos aparecieron mucho después del *Big Bang*. Podríamos decir, poniendo un

ejemplo paralelo, que las reglas del juego de ajedrez no existían antes de que alguien comenzara a jugar al ajedrez. Es evidente que los conocimientos científicos que poseemos forzosamente han de remitirse a épocas del Universo más o menos posteriores al *Big Bang*. De lo que sucedió antes de ese momento no sabemos prácticamente nada, excepto que las leyes de la naturaleza establecidas en la época actual no podrían mantenerse entonces en la forma en que las conocemos. Sin embargo, hay un elemento de conocimiento del que podemos fiarnos, propone Smolin, y es el tiempo. El tiempo ya existía y transcurría, y aportaba el cambio, tanto del mundo como de las leyes que rigen el mundo.

Creo que esta propuesta introduce una confusión entre varias ideas diferentes:

- (i) el grado de validez de las leyes «universales» que conocemos en la actualidad,
- (ii) la esperanza de conseguir muy pronto una teoría del todo, final y universalmente válida,
- (iii) la búsqueda de leyes que tengan una validez más amplia.

(i) El hecho de que el grado de validez de las leyes «universales» que conocemos hoy sea limitado y sin ambigüedad posible para todo el que posea una cultura científica. Los grandes progresos de la teoría científica han proporcionado aproximaciones, superadas cada vez por otras. Las leyes de Kepler que describían el movimiento de los planetas supusieron un triunfo, pero se revelaron falsas cuando se supo que los cuerpos se atraían. Las leyes de Newton fueron una de las grandes conquistas de la humanidad, pero resultó que Mercurio viola esas leyes. La relatividad corrige las leyes de Newton y predice los agujeros negros, el *Big Bang*, las ondas gravitacionales y otras muchas cosas, pero hoy pensamos que ya no es válida cuando los efectos cuánticos cobran importancia. El hecho de que las leyes de la física que conocemos tengan una validez limitada es hoy en día incontestable. Pero lo que puede calificarse de «histórico» no son las leyes descubiertas sino nuestro proceso de adquisición del conocimiento.

(ii) La idea de que seremos, hoy o muy pronto, capaces de escribir una «teoría del todo» es, a mi entender, una pretensión inapropiada. Todavía hay demasiados elementos fuera de nuestro alcance para poder creer que nos acercamos al momento en que se logrará formular una teoría completa del

Universo. No conocemos las leyes últimas del Universo, pero eso no quiere decir que lo que hoy damos por bueno resulte incorrecto mañana.

(iii) Por otra parte, la evidencia de conceptos cada vez más generales y de regularidades cada vez más amplias, que permiten enunciar leyes que tienen una validez cada vez mayor, es la esencia misma del método científico. Atacar el principio de este objetivo fundamental es como echar la soga tras el caldero. Por supuesto, las leyes de la física tienen un alcance limitado, pero esto no significa que la física no pueda ser vista más que como una sucesión de episodios contingentes. El punto de vista «histórico» es una manera de comprender la realidad que se sitúa a un nivel en que hechos accidentales e imprevistos surgen en el transcurso de los acontecimientos que describimos. Ahora bien, la física tiende precisamente a buscar otros niveles de descripción de la realidad en que los accidentes y la contingencia pueden ser explicados por determinismos más profundos. La experiencia nos ha enseñado que podemos formular leyes que son válidas «universalmente» en ciertos regímenes y en ciertas aproximaciones. Renunciar a este objetivo es renunciar a la herramienta más resolutiva inventada por el hombre desde las primeras láminas talladas en la piedra.

Las actuales leyes de la física (clásica) no son válidas para todo el Universo. Sabemos que ya no «funcionan» cuando nos acercamos mucho al *Big Bang* o queremos describir la evaporación de un agujero negro. Pero no hay razón alguna para pensar que no podamos hallar una teoría más amplia que englobe una parte más extensa aún del mundo al que tenemos acceso. ¿Tendríamos más oportunidades de comprender el Universo renunciando a esa paciente generalización? El Universo observable tiene sin duda una historia, y las leyes de la física se aplican de manera diferente según sus diferentes estadios, pero esto no quita que las leyes comunes se apliquen de manera muy general. Lo más sorprendente, en la cosmología contemporánea, no es el hecho de haber comprendido que la química no es válida antes de la formación de los átomos, ya que se trata de una tautología. Lo sorprendente es, en cambio, que algunas leyes descubiertas hoy describen con increíble eficacia los primeros momentos del Universo. Las mismas leyes físicas se aplican a las partículas hoy y hace 13 mil millones de años, a pesar de que las condiciones de temperatura y de densidad de energía son absolutamente diferentes. ¿Quién lo hubiera creído?

La cosmología moderna no se manifiesta a favor de leyes físicas que evolucionan. Al contrario, muestra leyes que evolucionan mucho menos de lo que cabría imaginar. La búsqueda de amplias regularidades y de conceptos

generales para comprender la naturaleza es más que nunca el motor de la física.

La noción de ausencia de tiempo, que es la base de nuestros esfuerzos por formular una teoría cuántica de la gravedad, no debe confundirse con la idea ingenua de un mundo helado y sin cambios. Invocar la ausencia de tiempo a un nivel fundamental es afirmar que los aspectos temporales de la realidad no están bien descritos por un tiempo universal único que «transcurre», es decir, por una única variable t en las ecuaciones fundamentales.

Esto no significa que el tiempo no tenga realidad. ¡Por supuesto que la tiene! Igual que tienen una realidad alto y bajo, rojo y azul, dulce y salado, caliente y frío. Basta tocar una sartén para comprobarlo. No obstante, la física no utiliza estas nociones cuando describe la naturaleza a un nivel fundamental. No hay que confundir lo que existe en una determinada escala o en una situación específica con lo que es necesario en la descripción elemental de la naturaleza. Los átomos individuales no tienen color ni sabor ni temperatura. Para comprobar el mundo elemental hay que prescindir de esas nociones. Del mismo modo que para comprender el mundo creo que hay que prescindir de la variable t .

Nuestra noción corriente del tiempo es una noción multiforme y de múltiples niveles, que contiene una gran variedad de hipótesis implícitas y de presuposiciones. El tiempo no es una noción que haya que tomar en bloque, todo o nada. Es un conjunto de cosas mezcladas por nuestra intuición, teniendo en cuenta los límites de nuestros sentidos. Si pudiéramos percibir la velocidad de la luz sin instrumentos, o percibir nanosegundos directamente, nuestra concepción intuitiva de la temporalidad sería completamente diferente. Sería simplista afirmar que estamos obligados a elegir entre una comprensión intuitiva de la temporalidad desarrollada sobre la base de nuestra experiencia no relativista, y una forma de realidad congelada, basada en una negación total del tiempo.

Desde el comienzo de nuestra larga colaboración, he discutido apasionadamente con Lee Smolin, y muchas veces hemos estado en desacuerdo. Esta es la belleza de la ciencia: se puede estar en desacuerdo total y al mismo tiempo aprender uno del otro gracias a la discusión generada por ese desacuerdo; seguir estando muy cerca como hermanos incluso con ideas opuestas.

Alain Connes y el tiempo térmico

Una parte importante de mi trabajo en Estados Unidos consistió en estudiar los problemas técnicos y conceptuales provocados por la gravedad cuántica, con el objetivo de obtener una teoría sin la variable tiempo y de comprender lo que esto significaba. Uno de los problemas es el siguiente: si el tiempo no existe en un nivel fundamental, ¿qué ocurre con el tiempo que percibimos como tiempo que transcurre; qué puede ser? ¿De dónde puede proceder esta característica principal del mundo macroscópico? A finales de los años ochenta estuve trabajando sobre una idea de posible solución a este problema. Esta idea tuvo consecuencias importantes en mi vida: me devolvió a Europa, gracias a un nuevo amigo y mediante un proceso intelectual nuevo.

El Universo es vasto y complicado: hay miles de millones de partículas y un número aún mayor de variables que describen los campos. Nunca podemos controlar todas las variables de un problema. Cuando tenemos ese control (es decir, en los casos más simples) podemos comprobar que el sistema está gobernado por ecuaciones dinámicas; y en el nivel fundamental, como ya hemos visto, el tiempo no aparece en esas ecuaciones. Pero en la mayoría de los casos solo medimos una parte muy pequeña de las innumerables variables que caracterizan un sistema. Por ejemplo, si estudiamos un trozo de metal a una temperatura determinada, podemos medir su temperatura, su longitud, su posición, pero no los movimientos microscópicos de cada uno de sus átomos que, como sabemos, son la causa de la temperatura. En esos casos, no solo utilizamos las ecuaciones de la dinámica para describir la física del sistema, sino también las de la mecánica estadística y de la termodinámica, que son ecuaciones estadísticas que nos permiten hacer predicciones, aunque no conozcamos los movimientos exactos de todas las variables microscópicas. Por tanto, la termodinámica es una rama de la física que puede estudiar los sistemas de un gran número de partículas, que describe mediante leyes, por tanto de forma estadística y no en el nivel de cada partícula.

La idea que permitiría recuperar un tiempo macroscópico a partir de una teoría fundamental atemporal es la siguiente: el tiempo solo aparece en el contexto estadístico termodinámico. Es decir, que sería un fenómeno emergente, producido por toda una serie de procesos a pequeña escala, pero que no se manifiesta más que en la escala superior, macroscópica. Otra forma de decirlo es que *el tiempo es un efecto de nuestra ignorancia* de los detalles del mundo. Si conociéramos perfectamente todos los detalles del mundo, a nivel atómico, no tendríamos la sensación de paso del tiempo. Pero solo percibimos promedios y resultantes, de los que surge globalmente una nueva noción, el tiempo, del mismo modo que experimentamos globalmente una

sensación de calor allí donde se han sumado grandes cantidades de moléculas en movimiento. En un nivel molecular, no veríamos más que movimientos, y ninguna molécula está caliente.

He trabajado mucho en esta idea del tiempo como fenómeno emergente y en la idea matemática que la sostiene, que ha de mostrar cómo fenómenos típicos vinculados al paso del tiempo pueden emerger de un mundo atemporal, cuando tenemos de ellos un conocimiento limitado. En cierta ocasión estuve en el Instituto Newton de Cambridge, en Inglaterra, una de esas magníficas instituciones que invita a científicos del mundo entero con el único objetivo de que se reúnan con sus colegas e intercambien ideas. Pero el ambiente ligeramente pretencioso que reina en Cambridge no me gustaba demasiado y cuando empezaba a pensar que estaba perdiendo el tiempo descubrí que mi vecino de mesa era una personalidad extraordinaria: Alain Connes.

Alain es uno de los más grandes matemáticos vivos. Ha recibido los premios internacionales más prestigiosos en su disciplina. Cuando empezamos a discutir, descubrí a un hombre con el entusiasmo y la pasión de un muchacho, con una inteligencia sorprendente, y un volcán de ideas no solo en matemáticas sino también en física, terreno en el que ha obtenido resultados sorprendentes.

Cenábamos uno al lado del otro, en el ambiente algo rígido y aburrido de Cambridge, e iniciamos una conversación sobre diferentes temas de la actualidad científica. Más tarde, y tras unas copas de vino, Alain dijo como de pasada: «Tengo una gran idea sobre cómo emerge el tiempo, pero nadie se la ha tomado en serio». Di un respingo y le pedí detalles. Tuve que insistir, ya que Connes no tenía ganas de entrar en cuestiones técnicas, pero finalmente empezó a explicarme la idea, dibujando diagramas con el tenedor en una servilleta y lanzando migas de pan al aire para ilustrar sus palabras. Tras un primer momento de confusión, comprendí que la idea que me explicaba era exactamente la idea en la que yo había estado trabajando. Subí a mi habitación y regresé con los trabajos que había publicado sobre el tema. Habíamos utilizado matemáticas muy distintas, pero Alain comprendió de inmediato que las mías no eran más que una derivación específica de las suyas.

Cuando un científico formula una idea nueva, tiende por lo general a creer que es correcta. Si nadie da su aprobación, muchas veces seguirá creyendo que tiene razón y que los otros están equivocados... Pero mantendrá ciertas dudas. Si descubre que otro ha llegado a la misma idea de forma

independiente, la tentación de creer que «nosotros» tenemos razón y que los otros «no entienden nada» es casi irresistible...

Alain y yo publicamos un artículo ilustrando esta idea, reuniendo los aspectos que él había comprendido y los que yo había comprendido. Y encontré en él un nuevo amigo, un amigo fantástico, con una pasión intelectual y una inteligencia únicas.

Nuestra idea consiste en considerar el tiempo como un fenómeno emergente, a partir de la mecánica cuántica y de la termodinámica. A ese tiempo lo llamo «tiempo térmico».

El tiempo térmico solo tiene sentido cuando se dan muchas variables, es decir, en un contexto térmico. Solo en ese contexto se manifiestan las características de la temporalidad: los fenómenos irreversibles, la memoria, la intención. En esencia, el origen de la temporalidad puede vincularse a la estructura no conmutativa de la mecánica cuántica: en mecánica cuántica, las operaciones no conmutan, y eso significa que hacer la operación A y después la operación B no es lo mismo que hacer B y después A. Ese es el verdadero origen del tiempo.

En los sistemas termodinámicos, el comportamiento es probabilístico y la entropía aumenta «con el tiempo». Así es como se produce el tiempo de nuestra experiencia. Y a la inversa, los sistemas que no son termodinámicos (un átomo solo o una partícula que viaja por el espacio, por ejemplo) no se ven afectados por la entropía y no presentan los fenómenos típicos del tiempo. Para ellos todo es reversible, no viven el tiempo como una variable especial.

Volvamos al ejemplo de «arriba» y «abajo». Son dos nociones fundamentales en nuestra experiencia diaria, pero que no aparecen en las ecuaciones básicas de la física clásica. El arriba y el abajo no existen en el Universo, todas las direcciones son equivalentes. Localmente, en la Tierra (o en Marte), los objetos caen «hacia abajo» debido al campo de gravedad. No es «el abajo» el que hace caer los objetos. Es la caída de los objetos la que «hace que exista» el abajo: exactamente lo contrario, por tanto. El abajo se define por las condiciones locales, es una resultante, un efecto, una consecuencia del campo de gravedad local. El abajo es simplemente «allí donde algo cae».

El tiempo puede verse de manera similar. «Antes» o «después» son palabras que en el nivel fundamental no quieren decir nada. Para un protón no hay un antes ni un después, todas las ecuaciones carecen de la variable tiempo. Pero si hablamos de una molécula incluida en un líquido incluido en un órgano incluido en un papagayo, por ejemplo, esos niveles de organización

están sometidos a las leyes de la termodinámica y a estados estadísticos que producen entropía. Y en consecuencia, tiempo.

El tiempo es simplemente «allí donde algo entropiza». A la dirección hacia la que se observa que aumenta la entropía la llamamos tiempo. Y la entropía fabrica el tiempo como la caída fabrica el abajo.

El abajo es «allí donde algo cae». El tiempo es «allí donde algo se enfría».

Había vivido diez años en Estados Unidos y empezaba a estar cansado. Tenía muchas ganas de volver a Europa, pero no sabía cómo conseguir una plaza. Mi colaboración con Alain fue providencial. El mundo científico funciona un poco como la corte del Rey Sol: basta haberse codeado con el rey para que se te abran las puertas. Alain es un rey algo anárquico, pero en cualquier caso es un rey. Unos meses después de la publicación de nuestro trabajo, me llamaron del Centre de Physique Théorique de Luminy, en Marsella, proponiéndome trabajar con ellos. No lo dudé ni un momento.

Regreso a Europa

Dejar Estados Unidos tenía su precio. Por encima de todo, eché de menos la presencia diaria de mis colegas de Pittsburgh, en especial la de Ted Newman, un gran científico (él fue quien consiguió la descripción más general de los agujeros negros, por ejemplo), pero sobre todo una persona dotada de una enorme humanidad, tremendamente honesta, capaz de observar y de comprender profundamente a los demás y de sonreír en cualquier circunstancia. Cuando yo estaba irritado por la conducta de alguien, Ted venía a mi despacho, se dejaba caer en una silla (tiene la complexión y la conducta de un gran oso) y me sonreía con tal dulzura e ironía que mi cólera cesaba de inmediato. Representó para mí un modelo, un afecto seguro y un punto de referencia.

Además, tenía que dejar atrás el preciado contacto con el Center for History and Philosophy of Science. Y había que prescindir también de la simplicidad directa de los estadounidenses, de su confianza en el Hombre, de su voluntad de obrar bien, tan diferentes de las trampas y de los obstáculos que lo hacen todo tan lento y tan complicado en Europa, donde todo parece estar atascado. Un europeo tiene mucho que aprender en Estados Unidos, donde se pueden probar muchas cosas que en Europa serían difíciles. A los jóvenes que prometen, Estados Unidos les ofrece puentes de oro, mientras que Europa les dice que esperen pacientemente su turno. Sin las perspectivas que

allí me ofrecieron, no habría conseguido mantenerme activo en el mundo de la ciencia.

Eso no quita que para un europeo vivir en Estados Unidos resulte difícil. Las relaciones humanas son distintas. Los valores son distintos. Hay demasiados aspectos de la cultura estadounidense que son intolerables: la extrema violencia urbana, las tensiones raciales, la pena de muerte, la falta de asistencia médica y de seguridad social para todos, el abandono a su suerte de los más débiles y de los más pobres, la arrogancia del dinero y del poder.

La idea misma de justicia social es casi opuesta a la que tenemos en Europa. En Estados Unidos, la justicia social significa que todo el mundo, *si tiene capacidades*, puede llegar a lo más alto, independientemente de cuál sea su origen. En Europa, en cambio, la justicia social significa la defensa de los débiles, por tanto, concretamente de aquellos que *no tienen capacidades especiales*.

Además, la política exterior estadounidense es insoportable. La ideología de la libertad y de la democracia sirve de cobertura a la agresividad imperialista y a la certeza de la superioridad norteamericana con una tremenda hipocresía. Tal vez sea una característica europea haber perdido el gusto por la conquista porque no queremos repetir los errores de nuestros crímenes pasados, o simplemente porque ahora somos más débiles. Pero la violencia continua de la política exterior estadounidense nos espanta. Tengo una aplicación en mi móvil que me manda un mensaje cada vez que un dron estadounidense mata a alguien en el mundo: los estoy recibiendo continuamente.

La mayoría de los europeos que emigran a Estados Unidos, tras un período de entusiasmo, sienten una fuerte nostalgia del alma hoy más calmada y más generosa de Europa.

Por otra parte, en el momento de mi regreso, las cosas empezaban a cambiar y se estaba creando un ambiente de miedo, de pesimismo y de fanatismo que ha dominado la vida civil de Estados Unidos desde la época de los Bush. Era el momento de marcharse.

Cuando llegué por primera vez a Marsella me deslumbró la luz del sol, el verde cristalino del mar, el encanto mediterráneo, viejo e intemporal, la extraordinaria mezcla de pueblos de esta vieja ciudad francesa, y me enamoré de ella en seguida.

El Centre de Physique Théorique de Luminy, en la Université de la Méditerranée, donde trabajo actualmente, está en las afueras de la ciudad, cerca del mar, en un entorno natural salvaje y espléndido: un sitio ideal para

estudiar. Vivo cerca del mar. Reparé una vieja barca de pescadores de madera, un *pointu* y mandé reconstruir su vieja vela latina y, cuando no trabajo, navego entre acantilados blancos y agrestes por donde vuelan las gaviotas.



Figura 9. A bordo de mi barco.

7. LOS BUCLES, LAS CUERDAS Y LOS OTROS

La teoría de los bucles en la actualidad

Hace quince años que trabajo en Francia, y estoy muy agradecido a este país por haberme brindado la ocasión de continuar mis investigaciones. La comunidad de investigadores que estudian los bucles ha crecido mucho a lo largo de este decenio. Solamente en Francia existen hoy grupos que hacen avanzar la teoría en Marsella, París, Lyon, Tours y Grenoble. En 2004, pese a mi fuerte resistencia inicial, Marc Knecht, el director de mi laboratorio de investigación, el CPT de Marsella, consiguió convencerme para que organizara una conferencia dedicada enteramente a la teoría de los bucles. La hice junto con dos colegas franceses, Laurent Freidel, de Lyon, que luego se marchó a Canadá, y Philippe Roche, de Montpellier, que durante un tiempo se dedicó a la teoría de los bucles. La conferencia tuvo un éxito que superó todas mis expectativas y dio lugar a una serie de conferencias internacionales en varios países europeos, así como en México, China y Canadá, que atrajeron la atención de cientos de investigadores, la mayoría de ellos muy jóvenes.

Gracias a todos estos esfuerzos, la teoría ha seguido creciendo, clarificándose y volviéndose más sólida y más simple. La versión más antigua de la teoría, que se sigue estudiando, sobre todo en Alemania, está basada en una separación estricta entre los aspectos espaciales y los aspectos temporales del espacio-tiempo. La versión más reciente, desarrollada principalmente en Francia, Canadá y Gran Bretaña, es más bien una versión «covariante», en la que los aspectos espaciales y temporales son tratados de una manera más uniforme. La diferencia es la misma que la que existe entre las dos formulaciones estándar de la mecánica cuántica: la formulación «hamiltoniana» por una parte, basada en la ecuación de Schrödinger, y la versión «covariante» por la otra, desarrollada por Richard Feynman en los años cincuenta. En este momento yo estoy trabajando en esta versión covariante «a lo Feynman» de la teoría.

En esta versión, para calcular los efectos físicos hay que calcular la «probabilidad de transición», es decir, la probabilidad de observar alguna cosa si alguna otra cosa ha sido ya observada. Siguiendo el método de Feynman, esta probabilidad de transición se calcula haciendo la suma de todas las «historias» posibles. En gravedad cuántica, las «historias» que hay que sumar son las distintas configuraciones del campo gravitatorio, es decir, las distintas configuraciones del espacio-tiempo.

¿Se puede hablar del espacio-tiempo, si el tiempo no existe? Sí, se puede hablar en el campo de los cálculos «a lo Feynman». La inexistencia del tiempo en las ecuaciones fundamentales de la teoría no impide que podamos hacer predicciones precisas. Por ejemplo, en vez de predecir la posición de un objeto que cae «al cabo de cinco segundos», podemos predecir su caída «después de cinco oscilaciones del péndulo», lo que en la práctica viene a ser lo mismo —en nuestras escalas y en nuestros regímenes de experiencia— pero nos evita hacer la mezcla entre un fenómeno referencial y un tiempo absoluto y nos libera de cualquier coacción sobre las formas posibles del espacio-tiempo.

Del mismo modo que podemos seguir designando con la palabra «espacio» las redes de espín, aunque se trata de algo muy alejado de nuestra vieja idea de espacio, también podemos seguir hablando de «espacio-tiempo» para indicar la manera en que las redes de espín se transforman una en la otra, es decir, para describir las «historias» de la evolución de las redes de espín.

En mecánica cuántica, solo se hacen predicciones probabilísticas. Si hemos visto una partícula en el punto A, podemos calcular la probabilidad de encontrar la partícula en el punto B. Una forma eficaz de hacer este cálculo, desarrollada por Feynman, es imaginar que *todas* las trayectorias posibles de A a B influyen en la probabilidad final. Es un poco como si la partícula siguiera todas las trayectorias a la vez. No es más que otra forma de decir que la partícula se deslocaliza en una nube de probabilidades.

Esta misma idea puede utilizarse para calcular la dinámica del campo gravitatorio cuántico. ¿Cuál es la probabilidad de ver una red de espín B, si acabamos de ver una red de espín A? Todas las posibles historias de A a B influirán en la probabilidad final. Cada una de estas historias puede interpretarse como un pedazo de espacio-tiempo. Es un poco como si innumerables espacios-tiempos diferentes estuvieran presentes todos a la vez.

Cada «historia de redes de espín» se llama *spinfoam* o «espuma de espín». La razón de ese nombre es la siguiente: imaginen que congelan una espuma de jabón o de cerveza y que la cortan con un cuchillo muy afilado. Si lo

piensan un momento, verán que la sección de espuma cortada es en realidad una red: la sección de cada superficie de la espuma da un enlace, y la sección de las líneas donde se encuentran las superficies da un nudo de red. Si se corta la espuma en láminas muy finas, se obtiene una sucesión de redes. En otras palabras: una espuma puede interpretarse como una sucesión de redes, o incluso una historia. Los espacios-tiempo formados por las «historias de redes de espín» son, por tanto, espumas de espín.

La descripción de la teoría de los bucles a partir de esas espumas de espín es actualmente una de las direcciones de investigación más activas, impulsada sobre todo por una serie de brillantes jóvenes investigadores que trabajan en Francia, como Etera Livine en Lyon, Alejandro Pérez, Simone Speziale y Eugenio Bianchi en Marsella o Karim Noui en Tours, y por Laurent Freidel, que se ha convertido en uno de los principales arquitectos de la construcción de la teoría.

Cada espuma de espín representa una posible historia de un estado A a un estado B, y existe toda una serie de espumas diferentes que pueden «narrar» el paso de A a B. Hay que tener en cuenta todas estas historias distintas y sumarlas para calcular la probabilidad efectiva de pasar de un estado a otro. Estos últimos años, se ha descubierto de forma independiente por parte de distintos grupos de investigación en Francia y en Canadá una formulación muy simple de la «amplitud» de una espuma de espín, es decir, de su contribución a la probabilidad de transición total, mientras que otros grupos de investigación ingleses, en Nottingham, han demostrado que las amplitudes así definidas eran perfectamente coherentes con la teoría de la relatividad general de Einstein.

Recientemente, se ha dado un nuevo paso importante con la demostración matemática de que esas amplitudes son finitas, gracias a los teoremas de Muxin Han, Winston Fairbairn y Catherine Meusburger. Se trata de un resultado muy importante, ya que sabemos que la aparición de magnitudes infinitas planteó enormes problemas en los inicios de la formulación de la gravedad cuántica.

Gracias a esos desarrollos, ya no falta mucho para que la teoría esté completa, y apenas puedo contener mi entusiasmo ante la idea de contemplar la formulación completa de una teoría de gravedad cuántica. Dicho esto, no sé si la teoría está realmente completa, y sobre todo no sé si es correcta, es decir, si describe realmente la naturaleza.

Las cuerdas y los otros

Además de la teoría de bucles, existe al menos otra teoría de la gravitación cuántica muy desarrollada: la «teoría de cuerdas», que supone que las partículas elementales no son partículas puntuales, sino pequeñas cuerdas. Aunque existe un cierto parecido entre las *cuerdas* y los bucles, la diferencia es enorme: las cuerdas son pequeños segmentos que se mueven *en* el espacio y representan las partículas de materia, mientras que los bucles *son* en sí mismos el espacio (es decir, el campo gravitatorio).

La teoría de cuerdas es mucho más ambiciosa que la teoría de bucles: además de buscar una solución posible al problema de la gravedad cuántica, es una teoría que intenta unificar todas las fuerzas y todas las partículas de la física. Se propone no solo reconciliar mecánica cuántica y relatividad general, sino también unificar todas las interacciones fundamentales de la física: hallar la «teoría final de todo». Personalmente, tengo la sensación de que este objetivo es excesivo, o prematuro.

En su manera de abordar el problema de la gravedad cuántica propiamente dicho, la teoría de cuerdas y la teoría de bucles no difieren solamente porque exploran hipótesis físicas diferentes, sino también porque son el producto de dos comunidades de científicos que tienen presupuestos distintos y que ven el problema de la gravedad cuántica desde ángulos diferentes.

Los «cuerdistas» reúnen sobre todo a físicos de altas energías, parientes de la teoría de los campos cuánticos (es decir, la aplicación de la mecánica cuántica a los campos), y del «modelo estándar» de las partículas, la teoría actual que mejor describe todos los acontecimientos del mundo físico, a excepción de los fenómenos gravitatorios. Desde el punto de vista de un físico de altas energías, la gravitación no es nada más que la última y más débil de las interacciones conocidas. Es natural, por tanto, que intente comprender sus propiedades cuánticas utilizando la estrategia que ha resultado ganadora en el resto de la microfísica. La búsqueda de una teoría de campo cuántico convencional, capaz de englobar la gravedad, se ha desarrollado durante varios decenios y, tras numerosos giros, momentos de entusiasmo y grandes decepciones, ha desembocado en la teoría de cuerdas. Los fundamentos de la teoría de cuerdas todavía no se entienden bien, pero es hoy una teoría de la gravedad cuántica muy estudiada, aunque suscita actualmente menos vocaciones que hace veinte años, por falta de progresos significativos durante este periodo.

La teoría de cuerdas, para funcionar, necesita un espacio de diez dimensiones y partículas supersimétricas, así como hipótesis muy sólidas que hasta el día de hoy no han tenido ni la más mínima confirmación experimental. No se acaba de entender cómo una teoría de diez dimensiones con partículas supersimétricas desconocidas podrá ser utilizada concretamente para deducir predicciones unívocas, comprensibles y aplicables al mundo en que vivimos, sin supersimetría, y con solo tres dimensiones espaciales. Durante años, los «cuerdistas» han estado convencidos de que las partículas supersimétricas estaban a punto de ser observadas. Cuando el gran acelerador de partículas de Ginebra, el LHC, empezó a funcionar, muchos cuerdistas estaban convencidos de que lo primero que vería el LHC serían las partículas supersimétricas. Pero estas no acudieron a la cita. El gran revuelo mediático que produjo el descubrimiento del bosón de Higgs permitió ocultar la dolorosa decepción de no haber encontrado la supersimetría.

La segunda comunidad, «los buclistas», está compuesta sobre todo por especialistas en relatividad general. Para un relativista, la idea de una descripción fundamental de la gravedad en términos de excitaciones físicas en un espacio de referencia suena «falso». La primera lección que nos enseña la relatividad general es que *no* hay espacio *en el que* la física pueda desarrollarse (salvo, por supuesto, con un enfoque aproximativo, macroscópico). El mundo es más complicado. Para un relativista, la relatividad general es mucho más que una teoría del campo para una fuerza especial, la gravedad. Implica que algunas nociones clásicas sobre el tiempo y el espacio no se adaptan en absoluto al nivel fundamental y exigen transformaciones tan profundas como las que ha introducido la mecánica cuántica. Una de esas nociones caducas es precisamente la de espacio de referencia que ocuparía la física. Hubo que renunciar a ella para comprender la gravedad relativista, descubrir los agujeros negros, la astrofísica relativista y la cosmología moderna.

De modo que para un relativista, el problema de la gravedad cuántica exige que la vasta revolución conceptual iniciada con la mecánica cuántica y la relatividad general concluya con una nueva síntesis. En esta, las nociones de espacio y de tiempo han de ser refundidas por completo para tomar en consideración lo que hemos aprendido de nuestras dos teorías «fundamentales» actuales.

Al contrario que la teoría de cuerdas, la teoría de bucles se formula desde el principio sin espacio de referencia. Intenta realmente captar la naturaleza del espacio-tiempo cuántico a nivel fundamental. En consecuencia, la noción

de espacio-tiempo que emerge de la teoría es radicalmente distinta de aquella en la que se basan la mecánica cuántica convencional o la teoría de cuerdas. En las ecuaciones de la gravedad cuántica de bucles no aparecen por ningún lado la variable t (el tiempo) ni la variable x (la posición), y sin embargo, estas ecuaciones son perfectamente capaces de predecir la evolución de un sistema. Además, no suponen la existencia de dimensiones suplementarias ni de partículas exóticas.

Si la teoría de cuerdas se estudia cada vez más y es más conocida que la teoría de bucles, es sobre todo por razones históricas. Esta situación refleja la física del siglo xx, en la que la relatividad general fue marginal. Como era muy complicada y en la práctica no servía para nada (en aquella época), esta teoría quedó relegada a una pequeña comunidad de físicos, muy prestigiosos pero cuyos trabajos eran confidenciales. En cambio, la mecánica cuántica tuvo un enorme desarrollo gracias a sus múltiples aplicaciones prácticas (el láser, la materia condensada, las partículas, la física nuclear, la bomba atómica...). Cuando ha surgido la urgencia de resolver el problema de la gravedad cuántica, aparecen dos puntos de vista diferentes sobre la cuestión: el de una pequeña comunidad que sigue la relatividad general y el de una gran comunidad que sigue la teoría cuántica de campos. Esa escisión cultural se mantiene viva. En las discusiones siempre hay «cuerdistas» que dicen: «Es que no entendéis la teoría cuántica de campos», y «buclistas» que responden: «¡Y vosotros no entendéis nada de la relatividad general!». Es posible que haya algo de verdad en ambas acusaciones...

Al margen de las cuerdas y de los bucles, existen otras ideas y desarrollos. Alain Connes, en especial, ha elaborado otra descripción matemática posible del espacio físico, la «geometría no conmutativa», muy motivada por la estructura de las fuerzas que actúan sobre las partículas elementales (el modelo estándar). Realiza en parte el mismo tipo de translación que Einstein cuando descubrió la relatividad especial inspirándose en la teoría de Maxwell sobre la fuerza electromagnética. He estudiado las ideas de Alain y hasta he contribuido a ellas con algunos artículos muy marginales, y no me sorprendería demasiado que la geometría no conmutativa formara parte, de un modo u otro, de la síntesis que buscamos.

Otras ideas muy interesantes sobre la gravedad cuántica son las propuestas de Roger Penrose, el inventor de las redes de espín. Su obra de divulgación publicada en castellano en 2006, *El Camino a la realidad: una guía completa de las leyes del Universo*, un poco ardua, constituye un fresco inmenso y penetrante sobre todo lo que sabemos del mundo.

Las relaciones entre el mundo de las cuerdas y el mundo de los bucles han sido a veces tormentosas y no es raro asistir a acusaciones desmesuradas («¡No entienden nada!», «¡Sus cálculos son completamente falsos!», «¡Sus trabajos están plagados de errores!») incluso (o sobre todo) en los comités científicos encargados de distribuir las subvenciones y las plazas para los jóvenes investigadores. No obstante, la confusión es inevitable en un ámbito que es la punta de lanza de la investigación, y a veces se producen agrias discusiones, hasta llegar a la irracionalidad, entre personas que han dedicado años a su pasión siguiendo un camino determinado. La polémica es un ingrediente necesario para la fertilidad y el avance del conocimiento.

Teorías establecidas y teorías hipotéticas

Por otra parte, es muy importante recordar que todas estas teorías son especulativas y pueden resultar completamente falsas. No quiero decir solamente que en un futuro podrían ser sustituidas por una teoría más eficaz, como lo han sido las teorías del pasado, sino que todas sus predicciones originales podrían ser refutadas por la experiencia. Es toda la distancia entre una aproximación y un error, y no sabemos aún de qué lado estamos. A la naturaleza no le importan nuestros juicios estéticos. La historia de la física teórica está llena de explosiones de entusiasmo por teorías «muy bellas» que han fracasado. El único árbitro es la experiencia, y a día de hoy no tenemos ningún resultado experimental que sostenga, ni que sea indirectamente, ninguna de las dos teorías que compiten por ocupar el lugar del modelo estándar y de la relatividad general. Al contrario, todas las predicciones que han sido formuladas hasta ahora por otras teorías candidatas (desintegración del protón, partículas supersimétricas, partículas exóticas, correcciones de la fuerza gravitatoria a corta distancia...) han sido *desmentidas* por la experiencia. Cuando se comparan estos fracasos con el inmenso éxito experimental de la mecánica cuántica, del modelo estándar y de la relatividad general, hay motivos para ser prudentes.

Es uno de los aspectos más difíciles del trabajo de investigador, que oscila entre la excitación de formular una nueva teoría y sentirse a punto de comprender un nuevo engranaje del mundo, y el riesgo de trabajar toda la vida en teorías que resultarán falsas. Peor aún si hay que abandonar el escenario sin haber podido establecer si eran verdaderas o falsas.

Creo que es importante establecer una clara distinción entre lo que sabemos y lo que conjeturamos. Lo que sabemos hoy del mundo físico depende de un puñado de teorías fundamentales que están establecidas y funcionan perfectamente en su ámbito. La distinción, a veces un poco vaga, entre teorías establecidas y teorías especulativas evoluciona constantemente, pero no es por eso menos esencial. Una teoría solo está establecida tras la confirmación experimental repetida de predicciones específicas.

La mecánica cuántica (con la teoría cuántica de campos, que es su aplicación a los campos físicos), el modelo estándar de las partículas elementales y la relatividad general de Einstein son teorías ya establecidas. Podemos añadir a esta lista las teorías más antiguas como la mecánica clásica o el electromagnetismo, que están incluidas en las anteriores. Estas teorías están comprobadas y son el fundamento de la técnica contemporánea. Podéis apostar confiadamente vuestro dinero o vuestra vida por sus predicciones (en su ámbito de validez).

Todo lo que va más allá —la gravedad cuántica, la teoría de cuerdas, la geometría no conmutativa, los modelos de unificación de las fuerzas fundamentales, la supersimetría, los universos con dimensiones suplementarias, los multiversos, etc. (incluida la casi totalidad de mi propio trabajo de investigación)— es, y sigue siendo, especulativo. Nada nos asegura que estas hipótesis describan correctamente nuestro mundo: no tienen ninguna confirmación experimental, nunca han sido utilizadas de forma concreta, y solo un loco se atrevería a apostar alguna cosa por la validez de sus predicciones.

Esto no significa que esas teorías no sean interesantes: las teorías hoy establecidas fueron en su día especulativas e inciertas. Sin embargo, no sabemos si las teorías que se exploran hoy serán las buenas: ha ocurrido más de una vez que una teoría adoptada y explorada por un gran número de científicos con pasión, lealtad y devoción, al ponerla a prueba resulta ser una falsa pista.

Cada investigador tiene sus ideas y sus convicciones —yo tengo las mías— y cada uno ha de defender sus hipótesis con pasión y energía: la discusión viva es el mejor procedimiento para buscar el conocimiento, pero la defensa de nuestro punto de vista no debe cegarnos, podemos estar equivocados. Lo que decide es la experiencia y no el número o la dialéctica.

Los científicos comunican a menudo de una forma errónea, más por omisión que deliberadamente. Fascinados por sus ideas, no distinguen en sus discursos entre una teoría establecida y una teoría especulativa. A menudo

presentan sus hipótesis como si fueran descubrimientos reconocidos. No es esta la actitud correcta frente a la sociedad que financia nuestras investigaciones. La falta de claridad sobre el carácter hipotético de las teorías presentadas resta credibilidad a la ciencia. La teoría de cuerdas, por ejemplo, se presenta a veces como si estuviera confirmada. Creo que se causa un gran daño a la ciencia cuando algunos divulgadores presentan como establecidas teorías que son todavía hipótesis. Es preciso que el público pueda confiar en los científicos, y estos han de mostrarse prudentes antes de anunciar que han «comprendido» o «explicado» un fenómeno.

Insisto en este punto porque además tengo la sensación de que la confusión entre teorías establecidas y teorías especulativas se extiende incluso en el seno de la comunidad científica. El efecto de esta deriva afecta especialmente a la formación de los jóvenes investigadores. Recientemente, con ocasión de una conferencia internacional, conocí a un joven investigador técnicamente brillante con el que hablé de dos teorías: la relatividad general y una teoría «de Yang-Mills supersimétrica $n = 4$ ». Cuando le mencioné el hecho de que una de las dos había sido verificada experimentalmente y la otra no, me preguntó ingenuamente: «¿Cuál?». Y no estaba bromeando. No entendía la naturaleza diferente de la teoría de la relatividad general, que ha proporcionado un gran número de predicciones, todas ellas comprobadas experimentalmente, y una teoría que no ha proporcionado ninguna. Esta confusión crea un gran malestar en la física fundamental.

La claridad respecto a la naturaleza especulativa de la teoría de bucles, de la teoría de cuerdas, o de todo lo que se formula «más allá del modelo estándar» es esencial para una ciencia sana y una comunicación clara con el público, ya que es la sociedad la que financia la ciencia.

Las ayudas a la investigación básica

Es bien sabido que hoy en día los programas de financiación de la ciencia están dirigidos cada vez más en todo el mundo hacia lo que puede ser útil para el desarrollo industrial y para las aplicaciones tecnológicas. Las ayudas a la ciencia pura están en caída libre. Evidentemente, se trata de una política cortoplacista. Si los dirigentes de Alejandría o los Médici de Florencia se hubieran centrado en la investigación aplicada, habrían considerado inútiles los trabajos de Euclides y de Galileo, y seríamos hoy una sociedad ignorante y pobre.

Todos los saltos hacia adelante en la comprensión fundamental del mundo han ido seguidos de importantes desarrollos tecnológicos. Los ejemplos son innumerables: las bases de la ingeniería moderna se encuentran en los cálculos de Newton respecto a la órbita de la Luna; la Revolución Verde en agricultura es básicamente la consecuencia de una curiosidad gratuita respecto a la transmisión hereditaria; la radio y la televisión surgieron inesperadamente de los trabajos de Maxwell sobre la naturaleza de la luz; la tecnología de los ordenadores no existiría sin las investigaciones del siglo xx sobre un objeto sin interés: el átomo; el sistema de localización geográfica (GPS) no funcionaría si Einstein no se hubiera preguntado por la naturaleza del tiempo. Cada sector tecnológico de nuestra sociedad moderna es el resultado de una investigación básica dictada por la curiosidad. Y la investigación básica solo se desarrolla si los que la dirigen tienen la lucidez de comprender su importancia.

Aun sin invocar la utilidad a largo plazo, Europa debe apoyar la investigación básica si quiere volver a ser uno de los centros intelectuales del mundo. Heredó de la civilización árabe la noción de Universidad y la desarrolló espléndidamente como lugar donde se intenta alcanzar el conocimiento en libertad y se transmite de generación en generación. Las universidades europeas de hoy son pálidos reflejos de su pasado, y a menudo pálidas copias de las mejores universidades estadounidense. Muchos sistemas académicos europeos recompensan más a los arribistas que controlan las reglas que a los jóvenes investigadores creativos y originales que apenas se preocupan de ellas. En la llamada «América materialista», la excelencia intelectual y la investigación impulsada por la curiosidad están muy valoradas. Cada vez hay más premios Nobel estadounidenses, y Estados Unidos ejerce una influencia cultural creciente, con consecuencias políticas importantes a largo plazo.

Creo que la fuerza más poderosa que forjó la civilización, sacándonos de las cavernas y liberándonos de la adoración a los faraones, es la *curiosidad*. Si Europa quiere conservar su curiosidad vital, ha de invertir en sus universidades como centros de cultura.

Volviendo a las cuerdas y a los bucles, el estado actual de la investigación básica es el de una gestación confusa. Tenemos buenas ideas y teorías bien desarrolladas, pero ignoramos si son correctas.

Tal vez la solución a los grandes problemas planteados, como el de la conciliación de la relatividad general y la mecánica cuántica, ya está formulada en nuestras teorías especulativas, de modo que solo falta verificarla mediante instrumentos que se están elaborando. Tal vez, por el contrario, no hemos encontrado nada bueno, y será un(a) joven Einstein aún desconocido(a), que lucha por conseguir una plaza de investigador, el que hallará la solución dentro de diez años. ¿O será alguno de vosotros, lector o lectora de esta obra, quien encuentre la idea que falta?

En el siglo VII antes de Cristo, la civilización griega está en pleno crecimiento. Surge mucho más tarde que otras grandes civilizaciones vecinas, Egipto y Mesopotamia, y recoge buena parte de su herencia, aunque difiere profundamente de ellas. Esas antiguas civilizaciones eran ordenadas, estables y jerárquicas. El poder estaba centralizado y la sociedad se perpetuaba para conservar un orden estable. Esas civilizaciones eran proteccionistas y tenían poco contacto con el exterior, excepto en caso de conflicto y de guerra.

El joven mundo griego, en cambio, es extremadamente dinámico, y evoluciona continuamente. No tiene un poder centralizado. Cada ciudad es independiente y en el seno de cada ciudad, el poder se renegocia constantemente con los ciudadanos. Las leyes no son sagradas ni inmutables: están sometidas a continua discusión, experimentadas y puestas a prueba. Las decisiones se toman de forma conjunta en las asambleas. La autoridad corresponde, ante todo, a quienes son capaces de convencer a los otros por medio del diálogo y de la discusión. Es un mundo abierto y capaz de absorber las civilizaciones vecinas. Los griegos, a diferencia de los egipcios y de los persas, viajaban mucho.

En ese clima cultural profundamente nuevo nació un concepto original: el conocimiento racional y crítico. Un conocimiento dinámico, que evoluciona, que se atreve a cuestionar las ideas tradicionales y que se cuestiona a sí mismo. La nueva autoridad del saber no procede de la tradición, ni del poder, ni de la fuerza, ni del recurso a verdades eternas, sino de la capacidad de convencer a los otros de la corrección de su punto de vista. La crítica de las ideas adquiridas no está prohibida, sino que es deseable, es la fuente viva del dinamismo y de la fuerza de este pensamiento, y la garantía de que seguirá mejorando. Es sin duda el alba de un nuevo mundo.

Las reglas básicas de la investigación científica son sencillas: todo el mundo tiene derecho a hablar. Einstein era un oscuro empleado en la oficina de patentes cuando elaboró ideas que cambiaron nuestra visión de la realidad. Las discrepancias son deseables: son la fuente del dinamismo del

pensamiento. Pero nunca debe regularlas la fuerza, la agresión, el dinero, el poder o la tradición. Solo se gana argumentando, defendiendo las ideas en un *diálogo* y *convenciendo* a los demás.

No voy a describir aquí la realidad concreta de la investigación científica en su complejidad humana, social y económica, sino las reglas ideales a las que la práctica ha de remitirse. Son reglas viejas que ya Platón describía con pasión en su famosa *Carta séptima*, donde explica cómo puede buscarse la verdad: «Y cuando después de muchos esfuerzos se han hecho poner en relación unos con otros cada uno de los distintos elementos, nombres y definiciones, percepciones de la vista y de los demás sentidos, cuando son sometidos a críticas benévolas, en las que no hay mala intención al hacer preguntas ni respuestas, surge de repente la intelección y comprensión de cada objeto con toda la intensidad de que es capaz la fuerza humana».

Hay que buscar la comprensión mediante un proceso intelectual sincero, mediante el aprendizaje, la escucha de la naturaleza y de los otros. El punto central es el reconocimiento honesto de que nuestras representaciones pueden ser falsas. Desde Platón, hemos recorrido un largo camino, pero seguimos en la vía que describió: una búsqueda ideal del conocimiento a través del *diálogo*, del acuerdo en el marco de una discusión racional.

Las relaciones de la ciencia con la democracia, nacida en el mismo lugar y en el mismo siglo, son evidentes. La democracia es, idealmente, el proceso por el cual la persona que toma las decisiones es la que ha sido capaz de *argumentar* sus ideas y de *convencer* a bastante gente. La democracia es un ideal que pide no aplastar a sus enemigos, sino escucharlos, discutir con ellos, buscar un terreno común y una comprensión común. Las palabras de Voltaire: «No estoy de acuerdo con lo que usted dice, pero lucharé para que pueda decirlo» son el núcleo mismo de la democracia y del método científico.

De modo que ciencia y democracia nacieron a la vez. Exactamente en los mismos lugares, en la misma época y del mismo espíritu: el de la racionalidad serena, de la inteligencia y del diálogo. Ese espíritu es uno de los pilares sobre los que se ha construido nuestra cultura.

Evidentemente, tanto en ciencia como en política existe un abismo entre el ideal y la realidad cotidiana. Pero esos ideales son análogos. El método más eficaz que hemos encontrado para comprender el mundo (la ciencia) y la mejor manera que hemos encontrado de organizar el proceso de decisión colectiva (la democracia) tienen numerosos puntos en común: la tolerancia, el debate, la racionalidad, la escucha del punto de vista opuesto, el aprendizaje, la búsqueda de ideas comunes. En ambos casos, la regla fundamental es tener

conciencia de que podemos equivocarnos, conservar la posibilidad de cambiar de opinión cuando un argumento nos convence, y reconocer que podrían imponerse puntos de vista opuestos a los nuestros.

Cada paso hacia adelante en la comprensión científica del mundo es también una transgresión en relación con lo que se creía antes. El pensamiento científico siempre tiene, por tanto, algo de subversivo, de revolucionario. Cada vez que rediseñamos el mundo, cambiamos la propia gramática de nuestros pensamientos, el marco de nuestra representación de la realidad. La misma palabra *revolución*, como sabemos, tomó el significado actual de la obra de Copérnico *Sobre las revoluciones*, en la que la palabra designaba simplemente los movimientos circulares de los planetas, especialmente el de la Tierra alrededor del Sol. El impacto de esta nueva visión del mundo fue tal que a partir de entonces toda «revolución» rinde un homenaje implícito a Copérnico.

Estar abierto al conocimiento significa, por tanto, estar abierto a lo revolucionario, a lo subversivo. Mi juventud de rebeldía halló su refugio en este pensamiento siempre subversivo.

En la escuela, en cambio, la ciencia se enseña a menudo como una lista de «hechos establecidos» y de «leyes», o como un entrenamiento para la resolución de problemas. Esta forma de enseñar traiciona la naturaleza misma del pensamiento científico. Creo que deberíamos enseñar el espíritu crítico, y no el respeto a los manuales. Debemos invitar a los estudiantes a poner en duda las ideas recibidas y a los profesores, y no a creerles ciegamente. De esta forma se ayudará a los jóvenes a creer en el futuro y se contribuirá a construir una sociedad viva y dinámica que avanza.

La ciencia debería enseñarse tal como es, una aventura humana fascinante, un encadenamiento de períodos de gran confusión, de exploración paciente de nuevas soluciones, de saltos conceptuales vertiginosos, de destellos de comprensión en los que las piezas del puzzle se ensamblan repentinamente: la Tierra se mueve, la información está almacenada en el ADN, todos los seres vivos tienen antepasados comunes, el espacio-tiempo es curvo... Es una larga historia llena de magia y de belleza. La enseñanza de la ciencia debería ser la enseñanza de la duda y de la fascinación.

Además, el desarrollo histórico de la ciencia siempre se ha producido a la par que el desarrollo de las artes, de la literatura y de la filosofía. Cada ámbito ha contribuido a la construcción de las ideas científicas, y a su vez ha sido alimentado por la comprensión del mundo en que se basa la civilización de cada época. Me gustaría ver una escuela que incite a los alumnos a

comprender y apreciar la aventura intelectual que dio lugar a las catedrales góticas y a los *Principia* de Newton, a la pintura sienesa del siglo XIV y a la biología molecular, a las obras de Shakespeare y a las matemáticas puras. Se trata de la misma herencia intelectual y solo tiene sentido si se contempla en su conjunto.

Hay tanta belleza, inteligencia, humanidad y misterio en una página de Schubert como en una página de Einstein. Ambos representan una forma de comprender la realidad, con profundidad y a la vez con fragilidad y ligereza. Me gustaría que los jóvenes aprendieran a apreciar a ambos, y encontraran en ellos claves para comprender el mundo y comprenderse a sí mismos.

Negros nubarrones se ciernen hoy sobre el planeta. El grado de desigualdad y de injusticia es mayor que nunca, y sigue aumentando. El clamor de certezas religiosas que separan a los hombres se multiplica a diario en boca de líderes políticos de todas las ideologías. Las personas se aferran a sus identidades locales, tienen miedo y desconfían unos de otros. Los conflictos se radicalizan. Los enemigos son considerados cada vez más como representantes del mal, y demonizados por ambos lados. El gasto militar aumenta considerablemente casi en todas partes. La negociación está cada vez más devaluada.

Contemplo esta oleada de irracionalidad con una inquietud y una tristeza profundas. La ciencia nos impulsa a reconocer nuestra ignorancia, nuestros límites, y el hecho de que en «el otro» hay más que aprender que temer. Que la verdad hay que buscarla en un proceso de intercambio, y no en las certezas o en la convicción, tan corriente, de que «somos los mejores».

De las diez Cruzadas que partieron de Europa, nueve derivaron en guerras llevadas a cabo por los Cruzados. La sexta cruzada fue resuelta por Federico II, gran espíritu europeo, simplemente negociando el control de Jerusalén con el sultán Malik al-Kamil, con gran disgusto del Papa, depositario de una verdad que no admite ser criticada ni compartida.

Creo que hoy, a pesar de las tensiones, está a punto de conformarse una civilización mundial. Las civilizaciones, como los hombres, florecen con la mezcla y se estancan cuando se encierran en sí mismas. Por eso la globalización actual es una maravillosa oportunidad para la humanidad, aunque produzca inquietud. El pensamiento científico, con su fuerza tranquila, dinámica y racional, herencia profunda de la antigua civilización griega recuperada y desarrollada por la Europa moderna, representa, tal vez más aún que la literatura, las artes o la filosofía, el núcleo de la herencia cultural que Europa aporta al mundo. El dinamismo, la capacidad de

cuestionar sus propios fundamentos que ha convertido el pensamiento científico en algo tan potente y tan fiable, puede llegar a ser también una de las raíces del éxito histórico europeo.

Por supuesto, los ámbitos en los que el enfoque científico se aplica directamente son limitados. La ciencia apenas interviene en la mayoría de nuestros problemas sociales o personales más vitales. Pero el pensamiento científico ha contribuido a formar nuestra sociedad y su pensamiento, y posee un valor de fundación cultural. Es uno de los mejores métodos que ha elaborado la humanidad para librarse de los errores, y para reunir un conocimiento que puede *ser compartido*.

Yo soy italiano, francés y europeo. Quiero ser europeo, y ciudadano del mundo. Las identidades no son antagonistas, sino que se enriquecen mutuamente. Si Europa significa ser más fuerte y defender nuestros privilegios de europeos, no me interesa. En cambio, si Europa reconoce sus crímenes y es capaz de trabajar por la paz y la justicia mundiales, por un mundo donde la agresión sea sustituida por el diálogo, creo que Europa podría unir el corazón todavía dubitativo de sus ciudadanos.

En ese caso, Europa podría ser un paso hacia nuestro sueño común más antiguo y más grande: un mundo compartido donde el diálogo se impone por encima de la agresión y de la fuerza.

Tal vez no sea más que un sueño. Una fantasía de un mundo diferente, que no es el mundo real. Pero lo que yo he aprendido de la ciencia es que no hay un único mundo real. El mundo no es nunca lo que creemos, cambia ante nuestros ojos.

Lo que ha construido nuestro mundo es la rebelión de las generaciones anteriores frente a los conceptos adquiridos, sus esfuerzos por pensar de otra manera. Nuestra visión del mundo, nuestras realidades, son sus sueños realizados. No hay motivo para temer al futuro: podemos seguir rebelándonos, soñando con otros mundos posibles y buscándolos.

Actualmente, vivo rodeado de jóvenes fascinados, como lo estaba yo hace más de treinta años, por la investigación fundamental, y que vienen a verme desde todos los rincones del mundo, como hice yo en otro tiempo. Les hablo, les explico lo que sé, esperando que entre ellos se encuentre aquella o aquel que será mejor que yo y conseguirá lo que no hemos sido capaces de conseguir.

Cuando me piden mi opinión, les desaconsejo vivamente que emprendan la carrera de investigador, como habían hecho conmigo mis profesores. Les hablo de la lucha encarnizada por obtener una plaza, de la dificultad del tema,

de los enormes riesgos de esta profesión exigente. Les digo que es peligroso seguir solamente sus pasiones. Pero en mi fuero interno espero que tengan la pasión y la fuerza de ignorar todas mis advertencias y de perseguir sus sueños.

AGRADECIMIENTOS

Además de las personas mencionadas en este libro, quisiera dar las gracias a los muchísimos amigos con los que he tenido la suerte de trabajar, y que han desarrollado las ideas y los resultados que aquí se describen: John Baez, Julian Barbour, John Barrett, Mauro Carfora, Louis Crane, Roberto DePietri, Hugo Morales-Tecotl, Giorgio Immirzi, Ted Jacobson, Gianni Landi, Jerzy Lewandowski, Renate Loll, Massimo Pauri, Jorge Pullin, Michael Reisenberg, Massimo Testa y Thomas Thiemann; y más aún a aquellos con los que tengo la suerte de trabajar actualmente: Emanuele Alesci, Eugenio Bianchi, You Ding, Bianca Dittrich, Jonathan Engle, Ed Wilson-Ewing, Winston Fairbairn, Muxin Han, Frank Hellmann, Thomas Krajewski, Kirill Krasnov, Elena Magliaro, Antonino Marcianò, Daniele Oriti, Roberto Pereira, Claudio Perini, Matteo Smerlak, Francesca Vidotto, Wolfgang Wieland y Mingyi Zhang.



Carlo Rovelli (Verona, Italia, 1956) es físico teórico, y uno de los fundadores de la llamada «gravedad cuántica de bucles». Es miembro del Instituto Universitario de Francia y de la Academia Internacional de Filosofía de la Ciencia. Responsable del equipo de gravedad cuántica del Centro de Física Teórica de la Universidad de Aix-Marsella, es autor de numerosos trabajos científicos aparecidos en las revistas más importantes de su ámbito y de dos monografías sobre la gravedad cuántica de bucles.

Ha publicado múltiples libros de divulgación, entre otros, *Siete breves lecciones de física* y *El orden del tiempo*. Colabora con frecuencia en la prensa italiana, especialmente en *Il Sole 24 Ore* y *La Repubblica*.

Índice de contenido

¿Y si el tiempo no existiera?

Prefacio a la segunda edición francesa

Prólogo

1. Un problema extraordinario: la gravedad cuántica

El lamentable estado de la física fundamental

2. Espacio, partículas y campos

La relatividad general

La mecánica cuántica

Gravedad cuántica

3. Nacimiento de la teoría de los bucles

Londres y Siracusa

Yale

Honestidad intelectual

Roma

4. Interludio: la ciencia o la exploración permanente de nuevas formas de pensar el mundo

El diálogo entre ciencia y filosofía

¿Qué es la ciencia?

Historia del espacio: Anaximandro

Historia del espacio: ¿una relación o una entidad?

¿Qué sabemos realmente?

5. Los bucles: granos de espacio, redes de espín, cosmología esencial y calor de los agujeros negros

Redes de espín

John Wheeler

¿Probar la teoría?

La cosmología esencial

La cosmología y las estrellas de Planck

6. El tiempo no existe

La relatividad del tiempo

La ausencia del tiempo
Lee Smolin rehabilita el tiempo
Alain Connes y el tiempo térmico
Regreso a Europa

7. Los bucles, las cuerdas y los otros
La teoría de los bucles en la actualidad
Las cuerdas y los otros
Teorías establecidas y teorías hipotéticas
Las ayudas a la investigación básica

Epílogo

Agradecimientos

Sobre el autor