



LA GRAVEDAD CUÁNTICA

La desaparición
del espacio
y el tiempo

PEDRO NARANJO

RBA

© Pedro Naranjo Pérez, 2017.

© de esta edición digital: RBA Libros, S.A., 2019.

Diagonal, 189 - 08018 Barcelona.

www.rbalibros.com

REF.: ODBO473

ISBN: 9788491874102

Composición digital: Newcomlab, S.L.L.

Queda rigurosamente prohibida sin autorización por escrito del editor cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra, que será sometida a las sanciones establecidas por la ley. Todos los derechos reservados.

Índice

Introducción

La revolución inconclusa

Átomos de espacio-tiempo

Cosmología cuántica

Observando las escalas más pequeñas

Bibliografía

Introducción

El siglo xx fue testigo de una revolución científica espectacular, comparable al surgimiento de la filosofía en la escuela de Mileto hace veintiséis siglos, que introdujo por primera vez la noción de causa natural para la explicación del mundo físico, rompiendo con la mitología y su pléyade de dioses. Comparable también al heliocentrismo de Copérnico, que desterró a la humanidad del centro del cosmos conocido, o a la teoría de la evolución de Darwin, que bajó al ser humano del Olimpo, situándolo junto al resto de las criaturas, e incluso a la reciente secuenciación del genoma humano, que promete llevar a nuestra especie a una fase sin precedentes. En efecto, dos teorías físicas sacudieron los cimientos del conocimiento humano a principios del siglo xx: una de ellas revolucionó nuestra comprensión del espacio, el tiempo y la materia; la otra expulsó el determinismo de las ecuaciones que rigen el microcosmos y las dotó además de un carácter discreto (los resultados de las medidas solo pueden ser ciertos valores). La primera es la relatividad general de Einstein; la segunda, la mecánica cuántica iniciada por Planck en 1900 y desarrollada por varios autores durante las tres décadas siguientes.

En primera instancia, puede parecer exagerado situar la relatividad general y la mecánica cuántica al mismo nivel que hitos como los citados al comienzo. Ciertamente, las ideas copernicana y darwiniana, además de suponer un

avance mayúsculo en la ciencia, hicieron saltar por los aires el aura de «especial» del ser humano, como un noble medieval al que, de repente, le dicen que el rey ha caído y que ya no va a gozar más de sus privilegios. La relatividad general y la mecánica cuántica no hicieron nada parecido a esto. Cada una de estas teorías, sin embargo, alteró de manera tan profunda conceptos tan arraigados en la mente humana que merecen entrar en el selecto grupo de las ideas científicas revolucionarias.

No obstante, cuando realizamos el viaje de lo muy grande a lo muy pequeño, y viceversa, descubrimos que las leyes que gobiernan cada una de esas escalas son incompatibles entre sí. No existe ninguna evidencia que indique que el universo haya de estar regido por distintas leyes a diferentes escalas, pero la mecánica clásica, que rige nuestra escala cotidiana, es distinta de la relatividad general. ¿Contradicción? En absoluto. La mecánica clásica (la gravitación universal de Newton y el electromagnetismo de Maxwell), como toda teoría científica, es aplicable dentro de un determinado dominio (desde las mareas y el arcoíris hasta el movimiento de planetas y satélites), es decir, representa una buena aproximación de los fenómenos naturales en tal rango. Pero, para velocidades grandes, comparables a la de la luz en el vacío, y masas grandes, del orden de varias masas solares, la mecánica clásica deja de describir correctamente los hechos. Ni siquiera es una buena aproximación. Es entonces cuando hemos de recurrir a la relatividad general, que extiende la mecánica clásica hasta escalas cosmológicas. Pero lo hace de tal forma que, en el límite de velocidades y masas pequeñas, sus ecuaciones se reducen

a las de Newton y Maxwell. Análogamente, la mecánica cuántica generaliza la mecánica clásica hasta el microcosmos, de manera que esta última se recupera al aumentar la escala del sistema. El problema es que la relatividad general no extiende la mecánica cuántica en ningún sentido. Ni viceversa. Necesitamos una teoría más fundamental que contenga ambas. Dicha teoría, aún por descubrir, es lo que los físicos teóricos llaman *gravedad cuántica*. La siguiente analogía es ilustrativa. Supongamos que miramos desde el exterior una pared con dos ventanas iluminadas, de modo que solo percibimos lo que hay detrás de cada una, pero no el resto de la habitación. Pues bien, la relatividad general y la mecánica cuántica son estas ventanas, mientras que la gravedad cuántica es la habitación completa a la que accedemos al abrir la puerta.

La necesidad de la gravedad cuántica la reveló el propio Einstein al año siguiente de introducir la relatividad general, antes incluso de que la mecánica cuántica se completase una década después. En la década de 1930 se inició la búsqueda sistemática de la teoría. Desafortunadamente, pronto quedó patente que la tarea era más ardua de lo previsto, y desde entonces tal búsqueda se ha convertido en un tormentoso viaje, con momentos de gran entusiasmo seguidos de periodos de dolorosa frustración, como la del escalador que, exhausto tras haber completado uno de los ochomiles, descubre que le quedan trece más por escalar. Por el camino, se han propuesto numerosas ideas, muchas erróneas, otras incompatibles entre sí, hasta alcanzar cierta coherencia en la forma de diferentes teorías que son objeto de investigación en la actualidad. En este libro nos centra-

remos en una en particular, conocida como *gravedad cuántica de bucles*. El interés de esta teoría es doble. Por un lado, es minimalista, en el sentido de que evita la introducción de ideas especulativas (al contrario que, por ejemplo, la teoría de supercuerdas, que requiere dimensiones espaciales extra, entre otras cosas): la gravedad cuántica de bucles solo tiene las tres dimensiones espaciales familiares y ningún elemento adicional. Por otro lado, respeta el legado conceptual de la relatividad general, a saber, que el espacio-tiempo no es una entidad absoluta, estática, sino dinámica, expuesta a la danza cósmica con la materia (esta propiedad se desecha en las supercuerdas, donde se vuelve a la concepción del espacio-tiempo anterior a la relatividad general). Es importante resaltar desde el principio esta distinción: la gravedad cuántica de bucles es una teoría de la gravedad cuántica cuyo principio es la unión consistente de los conceptos revolucionarios, y confirmados experimentalmente de forma asombrosa, de la relatividad general y la mecánica cuántica. Sin elementos accesorios, solo relatividad general y mecánica cuántica. Por tanto, lo que resulta de estas premisas es una teoría donde el espacio-tiempo es dinámico, discreto (existen «átomos de espacio-tiempo») y probabilístico; esto es, en esencia, la gravedad cuántica de bucles.

La imagen que la gravedad cuántica de bucles ofrece de las escalas más fundamentales del universo tiene un cierto carácter pintoresco. El espacio, ese concepto tan enraizado en nuestra mente, se vuelve discreto, baila al son de la materia, cual granos de arena arrojados al aire y medidos por el viento. La diferencia crucial es que entre dos granos de

arena hay algo: espacio (vacío o no). Entre dos granos, «átomos», de espacio-tiempo no hay nada. Ni siquiera vacío. Nada de nada. Estos átomos de espacio-tiempo son las unidades elementales de la gravedad cuántica de bucles.

La gravedad cuántica de bucles también tiene mucho que decir a escalas cosmológicas. En particular, el mismo inicio del universo se pone en tela de juicio. El famoso Big Bang, la singularidad o punto inicial que la gran mayoría de los físicos toma como el origen de todo, desaparece en la gravedad cuántica de bucles. En su lugar, se predice un «rebote» al considerar la actual expansión del universo hacia atrás en el tiempo. Esta situación se puede entender como la existencia de un universo «oscilante», que sufre fases de expansión y contracción sucesivas. Pero, desde un punto de vista conceptual, lo más relevante es la eliminación de la necesidad de un origen del universo, que en Occidente se suele tomar como una especie de dogma (incluso muchos cosmólogos siguen hablando del Big Bang como un hecho).

Además de dinamitar el Big Bang, la gravedad cuántica de bucles también predice una de las ecuaciones más celebradas y estudiadas de la física, la que describe la *entropía* de un agujero negro. La entropía es una manera de medir la «información perdida» de un sistema físico, es decir, lo que un sistema tiene pero no puede usarse. En la década de 1970, Bekenstein y Hawking derivaron una ecuación que ligaba la entropía de un agujero negro con el área de su *horizonte de sucesos*, algo así como una superficie imaginaria que separa las regiones del espacio-tiempo «fuera» y «dentro» del agujero. La gravedad cuántica de bucles pre-

dice dicha ecuación, dotándola, además, de una explicación geométrica, según la cual los átomos de espacio-tiempo son los estados microscópicos de dicho horizonte de sucesos.

Finalmente, la búsqueda de la gravedad cuántica también nos permite aprender varias lecciones sobre el concepto mismo de ciencia. Su historia, aun teniendo solo cien años, nos muestra cómo los sentimientos humanos pueden cobrar tanta relevancia que incluso llegan a dominar sobre el razonamiento. Dado que la observación de cualquier efecto asociado a la gravedad cuántica es extremadamente complicada, los físicos han de recurrir a otros criterios, como la coherencia matemática, que les sirvan de guías para la construcción de una teoría física. Esta situación ha propiciado que las diferentes teorías propuestas como solución al problema de unir la relatividad general y la mecánica cuántica sean muy sofisticadas matemáticamente, lo que hace difícil discernir lo realmente físico de lo puramente abstracto. Los físicos teóricos anhelan la llegada de datos observacionales que les ayuden a separar el trigo de la paja. El problema es que algunas teorías contienen tanta paja que se les olvida que es el trigo lo que deben buscar.

En este libro veremos cómo nos ayuda la historia de la física a arrojar luz sobre el camino que queremos explorar. Todos los grandes avances de la física se han llevado a cabo gracias a una profunda reflexión acerca de las teorías anteriores que describen su dominio de la realidad de forma espectacular. «Tirarse a la piscina» a probar alguna idea es inútil. En nuestro caso, nos tomaremos muy en serio tan-

to la relatividad general como la mecánica cuántica en la búsqueda de la anhelada gravedad cuántica.

La revolución inconclusa

La ciencia se desarrolla en dos etapas: en la primera, el trabajo del científico es aplicar un conjunto de leyes bien establecidas al mayor número posible de fenómenos; en la segunda, nuevas mediciones y resultados (a veces inesperados), o la visión de científicos excepcionales, evidencian que los cimientos de las teorías, aparentemente sólidos, están a punto de quebrarse. Estas dos etapas son esencialmente distintas. La segunda corresponde a las revoluciones científicas, en una de las cuales está inmersa la física teórica actual.

En 1900 el físico alemán Max Planck, tras varios fracasos propios y ajenos, finalmente logró encontrar la expresión que describía la distribución de energía asociada a la radiación emitida por un *cuerpo negro*, esto es, un objeto ideal que no refleja radiación alguna. La novedad de Planck fue asumir que la energía no es algo continuo, sino discreto, formada por pequeños «paquetes» llamados fotones. La idea es que, al igual que la materia no es continua cuando se observa a escalas muy pequeñas gracias al microscopio electrónico, sino que está formada por átomos, la radiación está constituida por «átomos de luz». Estos son los fotones. Con su descubrimiento, Planck rompía con la física clásica imperante del físico inglés Isaac Newton y el escocés James Clerk Maxwell, dando lugar a la revolución cuántica.

En 1915, el también físico alemán Albert Einstein finalizó el tortuoso viaje intelectual de una década que le llevó a generalizar la teoría de Newton de la gravitación. Su teoría, conocida como relatividad general, despojó a la física de los conceptos absolutos de espacio y tiempo, introducidos por el genio in-

glés en 1687. La idea revolucionaria de Einstein fue asociar la gravitación con la geometría del espacio: la gravitación «es» la curvatura del espacio. Las implicaciones conceptuales de esta teoría aún no se han digerido apropiadamente un siglo después, dado que el espacio deja de ser una estructura fija donde ocurren los fenómenos naturales para pasar a formar parte de los fenómenos dinámicos y cambiantes.

Planck y Einstein iniciaron una revolución que sigue vigente hoy día. Las teorías de las que fueron pioneros sacudieron el edificio del conocimiento clásico. La física cuántica introdujo lo discreto y probabilístico; la relatividad, el carácter dinámico del espacio. Sin embargo, a pesar del tremendo esfuerzo de miles de físicos durante el último siglo, ambas teorías han de completarse, pues cada una muestra indicios de la existencia de una teoría más fundamental. Ahora bien, la principal razón por la cual cada una de ellas está inacabada es la existencia misma de la otra: los principios físicos sobre los que se basa la una son incompatibles con la otra. Este es el gran desafío de la física teórica moderna. El reto de la *gravedad cuántica* es la construcción de una teoría que reconcilie lo cuántico y lo relativista.

Esta situación es análoga a tantas otras en la historia de la física. Al contrario de lo que pueda parecer, la contradicción entre dos teorías satisfactorias no es un problema, sino una oportunidad de oro para el progreso. Así, Newton descubrió la gravitación universal combinando las parábolas del físico italiano Galileo Galilei con las elipses del astrónomo alemán Johannes Kepler. Einstein construyó la relatividad especial para resolver la aparente tensión entre la mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell; una década más tarde, el genio alemán descubrió que el espacio-tiempo es curvo para reconciliar la gravitación newtoniana con la relatividad especial. Más aún,

estos y otros grandes avances en física se han logrado sin apenas resultados experimentales nuevos. Por ejemplo, en el siglo XVI el astrónomo polaco Nicolás Copérnico construyó su modelo heliocéntrico y fue capaz de calcular las distancias de los planetas al Sol usando únicamente las observaciones astronómicas del *Almagesto* de Ptolomeo, del siglo II.

Planck y Einstein, fundadores de las bases de la física cuántica, fotografiados en 1929 durante la entrega a Einstein de la Medalla Max Planck, por su contribución a la física teórica.

Esta es, precisamente, la situación actual con la gravedad cuántica. La ausencia de evidencia empírica directa sobre los efectos cuánticos de la gravitación está lejos de ser algo dramático: Copérnico, Einstein y, en menor medida, Newton comprendieron algo nuevo sobre el universo sin apenas nueva evidencia experimental, simplemente comparando dos teorías satisfactorias en aparente contradicción.

Conviene aclarar una cuestión sobre la construcción de teorías en ausencia de evidencia experimental. Esto no entra en conflicto con el hecho de que el conocimiento científico tenga una base empírica. Ciertamente, una teoría pasa el juicio de la naturaleza en el momento en que es confirmada por evidencia experimental nueva. Pero también el descubrimiento en sí mismo de una nueva teoría tiene una base empírica incluso sin nuevos resultados experimentales: esta base es el contenido empírico de las teorías anteriores. El avance se realiza mediante el esfuerzo de hallar el marco conceptual que encapsule tales teorías previas.

La revolución iniciada por Planck y Einstein constituye los cimientos sobre los que descansa la física actual. Nos sumergiremos en las profundidades conceptuales tanto de la relatividad general como de la mecánica cuántica, con la intención prioritaria de enfatizar la tensión existente entre ambas, responsable del carácter infructuoso y tortuoso de la búsqueda de la gravedad cuántica, con idea de analizar con algo más de detalle la «oportunidad de oro» mencionada antes.

El espacio y el tiempo se convierten en actores

Desde que el gran Newton publicase sus *Principios matemáticos de la filosofía natural* en 1687, la física había considerado el espacio y el tiempo como objetos absolutos, externos y eternos, sin que nada pudiese alterarlos. La trama cósmica experimentaba incesantes cambios: manzanas que caían, planetas que orbitaban, luz que se propagaba... Pero el espacio y el tiempo permanecían incólumes.

Esta visión absoluta del espacio y el tiempo duró hasta 1905, el *annus mirabilis* de Einstein. El físico alemán, en su intento de reconciliar el principio de relatividad de Galileo, según el cual las leyes de la física son las mismas en todo sistema inercial (que se halla en reposo o se mueve con movimiento uniforme respecto de otro sistema), con el electromagnetismo de Maxwell, elevó a principio la invariancia de la velocidad de la luz en el vacío, de modo que esta es la misma con independencia del estado de movimiento (el reposo es movimiento nulo) de la fuente y el receptor. La consecuencia inmediata de ello es que el espacio y el tiempo pierden su estatus de absolutos y eternos: no tiene sentido físico hablar de la «posición», sin más, de un objeto, ni del «tiempo», a secas, que ha durado tal proceso.