



HAWKING

ENTRE EL BIG BANG Y LOS
AGUJEROS NEGROS

ALONSO SEPÚLVEDA S.]

*El universo no sería gran cosa
si no fuera hogar de gente a la que amas.*
Stephen Hawking



Relatividad y teoría cuántica

Hay dos teorías físicas que identifican el siglo xx: la *relatividad* y la *mecánica cuántica*. La primera, obra de Einstein, y la segunda de Schrödinger, Heisenberg, Born, entre otros. Estas dos exitosas construcciones se refieren a aspectos diferentes de la realidad física.

La relatividad se desarrolló en dos etapas, la primera (1905) se conoce como *especial* porque hace referencia solo a los fenómenos físicos en sistemas de referencia en movimiento uniforme (inerciales) y afirma que la forma de las leyes físicas es invariante, es decir, la misma en todos ellos. La velocidad de la luz en el vacío —añade— es la misma para todos los observadores en estos sistemas. Esta teoría fue expresada en 1908 por Minkowski en términos de un nuevo escenario al que se llamó espacio-tiempo, un continuo de cuatro dimensiones que introdujo el tiempo como una coordenada del universo. De acuerdo con esta teoría, cualquier cuerpo con masa m contiene una energía $E=mc^2$, expresión de gran importancia en toda la física posterior.

La segunda etapa de la relatividad (1915) se llama *general* porque incluye entre los sistemas de referencia a los acelerados. En

todos ellos las leyes físicas tienen la misma forma. Un primer principio de esta teoría general —llamado principio de equivalencia— identifica los efectos que ocurren en un sistema acelerado con los que ocurren en un campo de gravitación, por lo que la teoría general de relatividad ha de contener una teoría de la gravitación. Lo novedoso es que en esta nueva teoría la gravitación entre los cuerpos no se realiza mediante fuerzas sino mediante la deformación del espacio-tiempo de Minkowski, lo que da lugar a que la teoría haga uso de una nueva geometría curva asociada al nombre de Riemann. El espacio-tiempo es ahora maleable, deformable por la presencia de la materia. Mientras mayor sea el contenido de materia mayor será la deformación, que puede alcanzar niveles tan altos que surgen fenómenos que no están presentes en la gravitación newtoniana, como los agujeros negros. Incluso la deformación puede depender del tiempo dando lugar a ondas gravitacionales, que fueron detectadas en 2016.

La relatividad general considera que el espacio es elástico, algo que podemos representar en un ejemplo en dos dimensiones con una lona elástica sostenida en sus bordes. Una canica que rueda seguirá

en movimiento rectilíneo uniforme, inercial. Si colocamos en la lona una bola pesada producirá una concavidad tanto más grande cuanto mayor sea la masa. Este será un espacio curvo bidimensional. Si ponemos en movimiento la canica, su movimiento será curvilíneo, incluso puede trazar órbitas cerradas análogas a elipses. De esta manera podemos simular la trayectoria curva de un planeta sin que la bola —el Sol— lo atraiga. Lo que observamos ahora nos muestra que el movimiento de los cuerpos en un espacio curvado por una masa excluye la acción de una fuerza, vale decir que hay ahora una nueva ley de inercia que anuncia que el movimiento de una partícula de prueba en un espacio curvo, en ausencia de fuerzas, es curvilíneo. El tiempo también se deforma debido a la presencia de la materia, de modo que los relojes marchan más lentamente cuanto más cerca se encuentre de grandes masas.

La segunda de las teorías que identifica al siglo xx es la mecánica cuántica. Resulta que en 1905 Einstein hizo pública una teoría de acuerdo con la cual la luz, cuyos aspectos ondulatorios eran ya bastante conocidos, presenta además aspectos corpusculares condensados en la noción de *fotón*, partícula bastante singular, sin masa en reposo pero sí en movimiento, que viaja a la velocidad de la luz, con la que pudo explicar el efecto fotoeléctrico. Lo que esta idea de Einstein implica es que la luz tiene una naturaleza dual: bajo ciertas circunstancias —como en la difracción— se comporta como una onda, bajo otras —como en el efecto fotoeléctrico— como una partícula. En 1925 De Broglie postuló la dualidad onda-partícula también para los electrones, lo que se hizo extensible para protones, neutrones y otras partículas descubiertas más tarde. Los electrones, cuyo carácter corpuscular era bien conocido, tienen también comportamientos ondulatorios; estos están en la base del funcionamiento de los microscopios electrónicos. Así pues, se llegó a la conclusión de que la dualidad onda-partícula era un fenómeno general en el mundo microfísico. De acuerdo con Born, la ecuación que describe los aspectos ondulatorios de los electrones —que lleva el nombre de Schrödinger— ha de interpretarse en términos probabilísticos. De hecho, la inclusión de la *probabilidad* en la mecánica de las partículas vino de la dualidad onda-partícula, de

la cual, además, pueden obtenerse las *relaciones de incertidumbre* para posición-momento y tiempo-energía. Una consecuencia ampliamente conocida de estas relaciones asegura que no pueden conocerse a la vez y con toda precisión la posición y la velocidad de una partícula.

Ahora bien, la relatividad especial tiene su aplicación más corriente en el estudio de partículas de alta velocidad, como ocurre en los aceleradores, mientras la relatividad general está presente desde 1915 en los estudios astronómicos y cosmológicos. La mecánica cuántica, por su parte, tiene su aplicación típica en la física de lo inmensamente pequeño, pocas veces a nivel cosmológico; una excepción es el caso de las enanas blancas, un tipo de estrellas con masas un poco mayores que la del Sol en las que la mecánica cuántica ha de ser aplicada para entender su comportamiento. Otra excepción son las estrellas de neutrones.

●
Yo considero al cerebro como una computadora que dejará de funcionar cuando fallen sus componentes. No hay un cielo o una vida después de la muerte para las computadoras descompuestas.

Hawking

..... ●

La relatividad especial y la teoría cuántica se refieren a dos aspectos diferentes de lo real, una a lo veloz (relativista), otra a lo muy pequeño (cuántico). ¿Y lo que es a la vez veloz y muy pequeño? A esta síntesis se refieren los estudios de Dirac en 1928 expresados en una ecuación cuántico-relativista, de la que surge, como un resultado sorprendente e inesperado, el espín del electrón, que corresponde *grosso modo* a una especie de giro de la partícula sobre sí misma.

¿Y la relatividad general y la mecánica cuántica? ¿Cómo conciliar la existencia de regiones del espacio-tiempo altamente deformadas, como los agujeros negros, con la mecánica ondulatoria,

con el principio de incertidumbre, en particular? Esta nueva rama de la física tiene de hecho un nombre, pero solo el nombre porque la teoría ha resistido todos los intentos de formulación desde hace casi cien años. Se llama gravitación cuántica. Como veremos en lo que sigue, Stephen Hawking dedicó ingeniosos esfuerzos a la elaboración de los fundamentos de esta teoría.

El hombre

En la mañana del miércoles 14 de marzo de 2018 —día del nacimiento de Einstein— murió en Cambridge, Inglaterra, Stephen Hawking, el físico más renombrado de la segunda mitad del siglo xx. Nació en Oxford el 8 de enero de 1942, exactamente 300 años después de la muerte de Galileo.

A los 21 años Hawking fue diagnosticado con una enfermedad devastadora, esclerosis lateral amiotrófica, ELA, una enfermedad degenerativa de las células nerviosas de la espina dorsal y del cerebro, que controlan la actividad muscular. A medida que avanza la enfermedad los músculos se van atrofiando hasta que reducen el cuerpo a un estado vegetativo. Se le dieron como máximo un par de años de vida. Contra este pronóstico, vivió 76 años. En este intervalo vital tuvo 2 matrimonios, 3 hijos y 1 nieto, escribió varios textos para especialistas en física y cosmología, como *La estructura a gran escala del universo* (con Ellis), más de 150 artículos científicos, varios libros de divulgación sobre los resultados de sus trabajos, como *Breve historia del tiempo* (1988, *best seller* 4 años, traducido a 45 idiomas y con cerca de 25 millones de ejemplares vendidos), *Agujeros negros y pequeños universos*, *Del Big Bang a los agujeros negros*; a los 32 años fue nombrado miembro de la Royal Society; de 1979 a 2009 fue titular de la cátedra lucasiana, puesto que una vez ocupó Newton; dictó numerosas conferencias y asistió a reuniones científicas en diversos lugares del planeta; en 1985 una neumonía lo obligó a respirar por un tubo y nunca más pudo hablar; viajó a la Antártida; su cumpleaños 60 lo celebró en un globo aerostático; en 2007 hizo parte del vuelo de un Boeing 727 cuya trayectoria específica permitía obtener ingravidez; participó en 5 episodios de *Los Simpsons*, también en *Futurama* y en algunos de la serie televisiva *The Big Bang Theory*; su voz apareció en un disco de Pink



Foto: Jim Campbell. Aero-News Network

Floyd, realizó multitud de entrevistas, y todo ello desde un cuerpo averiado sentado en una silla de ruedas y con un sintetizador de voz, a los que podía controlar con un pequeño número de movimientos, oculares, de sus mejillas, de unos pocos dedos. Desde este reducido entorno tecnológico escribió algunas ideas que están en la base de la teoría cuántica de la gravitación.

Su brillante intelecto y su curiosidad serán siempre un ejemplo para todos.

El premio Nobel no le fue concedido debido al carácter altamente especulativo de su trabajo y a que no hizo predicciones corroborables en su momento. Todavía no hay forma de contrastar sus propuestas. “La radiación de Hawking es un concepto brillante, pero no está comprobado por la experiencia. Por esta razón, el mayor premio científico de todos, el Nobel, eludió al profesor Hawking”, dijo Rees, uno de sus colaboradores.

Por otra parte, mientras lo usual es que la labor de los científicos sea generalmente muy discreta, la enfermedad de Hawking lo convirtió en la figura de culto que todos conocemos.

Según se ha dicho, sus cenizas descansarán en la abadía de Westminster, cerca de la tumba de Newton.

Agujeros negros

Un mes después de la publicación de la relatividad general, Schwarzschild resolvió exactamente las ecuaciones de la teoría para el caso de una masa

puntual y descubrió que existe alrededor de ella un radio en el que la gravedad superficial tiene un valor infinito. Desde esta superficie nada puede escapar hacia el exterior, tampoco la luz. Este radio de Schwarzschild, el *horizonte*, tiene para el Sol (cuyo radio es cercano a 700.000 km) un valor de 3 km. Si su masa pudiese ser concentrada en una esfera con este radio nada podría salir, y se convertiría en un objeto oscuro, un agujero negro.

Una estrella con una masa ligeramente superior a la del Sol, al pasar por sus etapas de secuencia principal y de gigante roja, se convertirá en una enana blanca, cuya masa máxima es 1,44 masas solares. El estudio de estas estrellas, realizado por Chandrasekhar, involucró por primera vez y de modo simultáneo la gravitación y la teoría cuántica. Si la masa fuese superior a las 1,44 solares, la estrella podría colapsar formando una estrella de neutrones. Pero si la masa fuese aún mayor, no habría forma alguna de frenar el colapso de la estrella, dando lugar a la manifestación más extrema de la gravedad: un agujero negro. Esto es lo que ocurre en el colapso final de una estrella con una masa mayor de 8 masas solares.

Un agujero negro se define por dos características: un horizonte del cual nada puede escapar y una singularidad en su centro. El nombre fue acuñado por Wheeler en 1967.

La relatividad general asegura que *lo que caiga a un agujero negro no puede volver a salir*. La información parece perderse casi del todo en su interior y sobreviven solo los valores de la carga, la masa y el momento angular. Todos los detalles se habrán perdido, como la forma geométrica de lo que cayó, su composición química, la proporción de los elementos, la temperatura, la estructura cristalina, la antigüedad, los esfuerzos internos... Los agujeros negros —se dice— son calvos.

Una historia diferente, sin embargo, es la que puede escribirse si se introducen argumentos cuánticos en la teoría de agujeros negros, como lo hizo Hawking.

Radiación de Hawking

La física cuántica se ocupa de cosas ultrapequeñas como moléculas, átomos y partículas elementales, ámbito en el que pueden despreciarse, por sus pequeñas masas, los efectos gravitacionales. La relatividad general, por su parte, se aplica a objetos

masivos como planetas, galaxias y agujeros negros. La dificultad surge cuando han de considerarse cosas pequeñas y muy densas, en cuyo estudio hay que tomar en cuenta a la vez la gravitación y los efectos cuánticos, como en los agujeros negros o el universo en el momento del Big Bang.

Para entender la radiación de partículas desde agujeros negros primero hay que tomar en cuenta que el *vacío clásico*, el imaginado en la teoría de Newton, es la ausencia pura de partículas y radiación. En este vacío nada existe. Esta versión de vacío es rechazada por la teoría cuántica, que lo sustituye por un espacio que es un hervidero de partículas, un lugar altamente fluctuante en el que de modo continuo, y por períodos de tiempo muy cortos, aparecen y desaparecen parejas de antipartículas. Es el *vacío cuántico*. En él, por ejemplo, una pareja protón-antiprotón existiría solamente durante una millonésima de millonésima de millonésima de segundo (10^{-24} segundos), lo que muestra que a nivel cotidiano estos fenómenos no son observables. Pero sus efectos en el micromundo son verificables.

Este hervidero de partículas es consecuencia del principio de incertidumbre, el que en efecto permite la aparición, desde nada, de parejas partícula-antipartícula que normalmente se aniquilan entre sí, devolviendo la energía que tomaron prestada violando por un brevísimo tiempo la conservación de la energía; estas partículas se conocen como “virtuales”. Sin embargo, si la creación de pares ocurre muy cerca de la superficie de un agujero negro y en su exterior, existe la posibilidad de que un miembro de la pareja viaje al interior y el otro se aleje hacia el exterior. En este caso, y debido a la intensa gravedad cerca del horizonte, la pareja toma energía del campo de gravitación y se materializa convirtiendo las partículas “virtuales” en “reales”. La partícula que escapa al exterior porta con ella masa y disminuye por tanto la masa y energía del agujero negro. También la carga, si el agujero negro la tiene. Hay así emisión de partículas por parte del agujero, fenómeno al que se conoce como *radiación de Hawking*. Este flujo hacia el exterior contiene partículas de todo tipo, incluyendo fotones, que se forman también extrayendo energía del campo de gravitación. Esta radiación se asemeja a la de un cuerpo caliente y depende de la masa



del agujero. Como consecuencia, *los agujeros negros no son completamente negros* y su frontera no está tan definida como se supone en la teoría de Einstein.

De acuerdo con la teoría de Hawking, mientras mayor sea la masa del agujero negro menor es la rapidez con la que emite radiación. Uno de poca masa tiene más alta temperatura y desaparecerá más rápido que uno masivo. Uno de dimensiones atómicas (un miniagujero, de los que según Hawking abundarían en las épocas cercanas al Big Bang) desaparecerá casi inmediatamente después de ser formado. Esto significa que tal vez podrían verse emisiones de miniagujeros de épocas cercanas al comienzo del universo, aunque no hay hasta ahora evidencia alguna. Así pues, en síntesis, *contrario a lo que asegura la teoría de Einstein, un agujero negro puede evaporarse*; no se conoce sin embargo cómo ocurran sus últimos instantes.

La teoría de radiación desde agujeros negros comenzó poco después de una visita de Hawking a Moscú en 1973, donde Zeldovich y Starobinski le demostraron que los agujeros negros deberían emitir partículas. Los cálculos, revisados por Hawking, resultaron correctos y fueron completados, y resultó de ahí la teoría de la radiación de Hawking. La hipótesis que alimenta los cálculos comienza con el principio de incertidumbre y la formación de parejas de antipartículas.

La teoría alteró por completo los estudios sobre agujeros negros, al inaugurar la idea de que podrían evaporarse hasta desaparecer. Los cálculos aparecieron en la revista *Nature* en 1974 en un artículo titulado “¿Explosiones de agujeros negros?”. Aquí comienzan los intentos de Hawking de conectar la gravitación con la teoría cuántica.

Los efectos cuánticos hacen que los agujeros negros brillen como cuerpos calientes con una

Mi objetivo es simple. Es un completo conocimiento del universo, por qué es como es y por qué existe.

Hawking

temperatura tanto más alta cuanto menor sea la masa del agujero negro. Además, el área del horizonte solo puede aumentar como pasa con la entropía, que es una medida del volumen de información que se pierde durante el colapso.

Este resultado estableció una profunda e inesperada relación entre gravitación y termodinámica.

Las partículas emitidas por los agujeros negros tendrían propiedades altamente aleatorias, por lo que cuando un agujero negro desaparece la información de todo lo que en él hubiera caído se perdería para siempre. Es decir, los agujeros negros en explosión añaden aleatoriedad e impredecibilidad al universo, al borrar la información acerca de lo que cae en el agujero.

Este resultado va contra las leyes de la teoría cuántica que prohíbe la destrucción de la información y plantea un conflicto llamado “paradoja de la información”, aunque finalmente Hawking reconoció, después de un debate de más de 40 años, que la información no se pierde, que las partículas emitidas preservan de alguna manera la información contenida en lo que el agujero alguna vez absorbió. Ni él ni otros han concebido una explicación clara y convincente acerca de cómo el agujero preserva la información.

El fallo en la explicación está, piensa Strominger, en que se ha pasado por alto la capacidad del vacío en torno al agujero para almacenar información; tal vez esté contenida en los gravitones cerca de la superficie. ¿Y cómo explicar la transferencia de la información a la radiación de Hawking? Nadie lo sabe con certeza. Tal vez hay, cerca del horizonte, lo que se ha llamado un Muro de Fuego (*firewall*) que podría convertirlo en una especie de membrana de muy alta energía que atrapa temporalmente lo que cae al agujero y luego lo libera. El debate continúa.



Hawking en el Auditorio Morton de la Universidad George Washington, abril de 2008. Foto: NASA, Paul E. Alers

“je ne regrette rien.
Esta frase compendia mi vida”,
confesó en una entrevista,
haciendo referencia a una canción
de Edith Piaff.

Según la teoría de Hawking los pares de partículas creadas en la cercanía del horizonte están entrelazadas, lo que implica que el comportamiento de cada una está correlacionado con el de la otra. No solo eso: cada nueva partícula emitida estaría entrelazada con *todas* las previamente emitidas, con lo que es imposible recuperar la información que abandona el agujero negro, pues se requiere “desentrelazar” toda la radiación emitida hasta el momento. Este doble entrelazamiento viola el que se creía que existía solo entre partícula y antipartícula, lo que empeora la paradoja de la información.

Singularidades

Un trabajo complementario del anterior sobre agujeros negros, que los conecta con la teoría del Big Bang, es un ejemplo hermoso de la forma de pensar de Hawking. Veamos.

En 1929 Hubble descubrió el movimiento de las galaxias; estas se alejan de nosotros según una ley que conecta su distancia y su velocidad. Según la relatividad general este alejamiento es explicable, no como un movimiento efectivo de las galaxias en el espacio, sino como *expansión del espacio*, manteniendo inalteradas las coordenadas de las galaxias. La pregunta que surge es simple: ¿estuvieron juntas las galaxias en un mismo lugar al comienzo del universo, en el momento del Big Bang?

Uno de sus artículos más conocidos, redactado con Penrose a finales de los años sesenta, contiene la demostración de que la relatividad general conduce a una *singularidad* en el espacio-tiempo, esto es, a una condición física de curvatura infinita del espacio-tiempo en la que las ecuaciones de la relatividad general se tornan inválidas, al dar lugar a valores infinitos de las variables físicas típicas como la presión, la densidad de masa y la temperatura. Una singularidad sería el principio del universo. Este comenzaría en una situación que no contaría con ecuaciones que pudieran dar cuenta de las condiciones iniciales, haciendo necesario el concurso de un Creador que se encargaría de escogerlas.

Si hay una singularidad en el Big Bang, entonces la teoría general de relatividad no es completa, precisa de un ingrediente adicional que podría ser la teoría cuántica.

En un trabajo posterior, Hawking conectó la teoría de agujeros negros con la cosmología convirtiendo el colapso de materia que da lugar a los agujeros negros en una explosión, mediante el expediente simple de invertir la dirección del tiempo. Esto permitió entender la teoría del Big Bang desde la relatividad general. Como el Big Bang es el reverso temporal del colapso gravitacional, el universo resulta tener un comienzo, una singularidad en el comienzo del tiempo, como el colapso presenta una singularidad al final.

Horizonte aparente

“No hay agujeros negros, al menos en el sentido en que los conocemos”, escribió Hawking en un artículo publicado *online* en enero de 2014, en el que se deshizo de la noción de horizonte —frontera invisible desde cuyo interior ni partículas ni luz pueden viajar nunca hacia afuera—, incompatible con la teoría cuántica. El horizonte impuesto por la relatividad general fue entonces reemplazado por un “horizonte aparente”, frontera que retiene solo de modo temporal la radiación y las partículas que llegan al agujero, permitiendo que escapen luego siguiendo reglas que vienen de una teoría de gravedad cuántica a la que —reconoce— le falta todavía mucha elaboración.

De acuerdo con Hawking, la razón de la existencia del horizonte aparente podría ser que los efectos cuánticos alrededor de un agujero negro generarían fluctuaciones tan violentas del espacio-tiempo que impedirían la existencia del horizonte de Schwarzschild como una región con un radio definido, permitiendo más bien la existencia de un nuevo tipo de horizonte de contornos difusos configurados por la teoría cuántica.

Parece que Einstein erró por partida doble cuando dijo que Dios no juega a los dados. La consideración de la emisión de partículas de los agujeros negros denotaría que Dios no solo juega a los dados, sino que los lanza a veces donde no pueden ser vistos.

Hawking

Tiempo imaginario

Consideremos un último tema en los trabajos de Hawking. Si se piensa en la dirección del


tiempo real, el usual en física, la consecuencia de un colapso gravitacional es una singularidad en el espacio-tiempo. Pero la dirección del *tiempo imaginario* (una versión matemática que hace parte de los números complejos), introducido por Hawking en una nueva teoría cosmológica, es perpendicular a la del tiempo real. El resultado final es que las tres direcciones del espacio y el tiempo imaginario formarían un espacio-tiempo cerrado en sí mismo, sin límites, ni bordes.

En este universo autocontenido no habría comienzo ni fin, ni en el espacio, ni en el tiempo. Como consecuencia, en cada momento y lugar todo quedaría enteramente determinado por las leyes de la física, sin singularidades de ningún tipo. No habría instante ni lugar en el universo donde las leyes físicas pudieran colapsar. Estos resultados, según Hawking, obvian la necesidad de un Creador.

¿Qué es lo que alienta fuego sobre las ecuaciones y las hace gobernar un universo? ¿Es tan apremiante la teoría unificada definitiva que determina su propia existencia? Aunque la ciencia pueda resolver el problema del comienzo del universo, no es capaz de responder a la pregunta ¿por qué se molestó el universo en existir? Ignoro la respuesta, escribió Hawking

Coda

Hay temas que aquí no hemos tocado, que dejamos al lector, y que son muestra de la versatilidad, el ingenio y la curiosidad de Hawking: miniuniversos, agujeros blancos, viajes en el tiempo, miniagujeros negros, posibilidad de vida extraterrestre, sobrepoblación planetaria, entre otros.

Ha sido un momento glorioso estar vivo e investigar sobre física teórica. Nuestra imagen del universo ha cambiado mucho en los últimos 50 años, y estoy feliz de haber hecho una pequeña contribución, declaró Hawking alguna vez. 

Alonso Sepúlveda S. (Colombia)

Físico de la Universidad de Antioquia. Realizó estudios de posgrado en el Hunter College de Nueva York. Desde 1990 ha sido investigador del Centro Internacional de Astrofísica de la Universidad Sapienza de Roma. Ha publicado, entre otros, *Estética y simetrías* (2003), *Un viaje en el espacio y en el tiempo* (2010), *El instante luminoso* (2012) y *Bases de astrofísica* (2014).