

El legado científico de Stephen Hawking (1942-2018).

Primera parte

J. Rubén Morones Ibarra

Facultad de Físico-Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León
rubenmorones@yahoo.com.mx

RESUMEN

El trabajo científico de Stephen Hawking contiene importantes contribuciones a la astrofísica y a la cosmología. Entre sus más notables están: la radiación de los agujeros negros, el teorema de las áreas y la termodinámica de esos cuerpos astronómicos. Estudió el problema de las singularidades de la relatividad general, para explicar cómo se forman los agujeros negros y cómo se originó el universo. Fue el iniciador de la cosmología cuántica e impulsó los estudios sobre teoría cuántica de la gravedad.

PALABRAS CLAVE

Agujeros negros, radiación de Hawking, teoría del big bang, cosmología.

ABSTRACT

The Hawking scientific work includes important contributions to astrophysics and cosmology. Among them are the black hole radiation, the area theorem about the black holes. He investigated the problem of singularities of general relativity to explain how a black hole forms and the origin of the universe. He was the pioneer in quantum cosmology and contributed to the first studies in quantum gravity.

KEYWORDS

Black holes, Hawking radiation, big bang theory, cosmology.

INTRODUCCIÓN

Stephen Hawking, el famoso cosmólogo británico recientemente fallecido, se inicia en el estudio de la astrofísica y la cosmología durante sus estudios de doctorado en la Universidad de Cambridge, en Inglaterra, en el período de 1962 a 1966. Ahí conoció al matemático Roger Penrose, quien en ese tiempo desarrolló nuevas ideas sobre los agujeros negros (AN).

Desde el principio de sus estudios de doctorado se interesó por la astrofísica y quería realizar su proyecto de tesis con Fred Hoyle, quien era el astrónomo más famoso del mundo. En ese tiempo había dos teorías sobre la estructura del universo que competían entre sí. Una era la del universo estacionario y la otra, la del Big Bang. Hoyle no aceptaba esta última, era partidario de la teoría del universo estacionario. Por otra parte, debido a que tenía demasiados estudiantes, la solicitud de Hawking de trabajar con él no fue aceptada.

Probablemente Hawking tuvo suerte de no ser aceptado por Hoyle, ya que las ideas de este astrónomo fueron rebatidas y desacreditadas completamente, cuando en el año de 1964 se descubre la radiación de fondo del universo, que dio un fuerte apoyo a la teoría del big bang, que Hoyle rechazaba. A Hawking le asignaron como supervisor al astrofísico Dennis Sciama, quien también era partidario de la teoría del universo estacionario, sin embargo, cuando se presentaron evidencias cosmológicas que fortalecían la teoría del big bang, el aceptó los nuevos hallazgos, abandonando sus antiguas ideas. Sciama resultó ser un muy buen asesor en los estudios de doctorado de Hawking, dejando a este en libertad de escoger el tema de su tesis doctoral.

Penrose había publicado un artículo donde establecía que el colapso de una estrella de una masa superior a cierto valor, en la última etapa de su evolución, proviene de una singularidad del espacio tiempo. Este resultado se interpreta físicamente como el fin del tiempo y esto es lo que ocurre en los AN. Este resultado motivó a Hawking a extender la idea al cosmos, pensando que el big Bang representa también una singularidad del espacio-tiempo.¹

Hawking tuvo la idea de que el resultado de Penrose en el caso de los (AN) se podía extender y aplicar a todo el universo.

Hawking se doctoró en física teórica en 1966 con la tesis “Properties of expanding Universes” “Propiedades de los universos en expansión”.

EL INICIO DE SU CARRERA CIENTÍFICA

A partir de las ideas de Penrose y del interés de Hawking en el tema, se estableció una estrecha colaboración entre ambos, de donde surgieron una serie de resultados que llevaron a Hawking a probar varios teoremas sobre AN.

En el año de 1974, Hawking introdujo una idea revolucionaria en la teoría de los agujeros negros, que cambió por completo la forma de estudiar estos objetos astronómicos. En ésta combinaba, por primera vez en la física, las dos grandes teorías de esta ciencia: la mecánica cuántica y la relatividad general. La publicación de los resultados que obtuvo le dio prestigio y fama mundial en el ambiente científico, con lo que empezó su fructífera carrera en la ciencia.

A pesar de su enfermedad Hawking disfrutó de la vida. Fue un apasionado de su trabajo científico y contagió su pasión a muchos jóvenes en el mundo. Condenado a moverse en una silla de ruedas y a comunicarse mediante aparatos electrónicos, declaró en una ocasión que era más feliz ahora, con su enfermedad, que antes de que la padeciera. “Antes de mi enfermedad me aburría la vida”, dijo.^{2,3,4}

Como ya se mencionó, Hawking se interesó por la astrofísica y la cosmología. Estas dos ciencias son ramas de la física. La astrofísica se ocupa del estudio de las propiedades físicas de los cuerpos astronómicos. Por otra parte la cosmología se encarga de estudiar al universo como un todo. Esto incluye el origen del universo, su evolución y su destino. Los estudios en estos dos campos de la ciencia están basados en la teoría de la Relatividad General (RG) de Einstein.

La esencia de la RG está contenida en las ecuaciones del campo gravitacional de esta teoría, conocidas como ecuaciones de campo de Einstein. Se trata de ecuaciones diferenciales parciales, como las ecuaciones de Maxwell para el

campo electromagnético, que relacionan la geometría del espacio-tiempo, determinada por la curvatura, con la distribución de materia y energía en este mismo espacio-tiempo.

Un concepto importante en las ecuaciones diferenciales es el de singularidad. En el caso de las ecuaciones de Einstein, decimos que existe una singularidad cuando la curvatura del espacio-tiempo es infinita, en cualquier sistema de coordenadas que usemos. Estas soluciones son físicamente inaceptables y como no las podemos eliminar, la conclusión es que la teoría, que está descrita por las ecuaciones diferenciales, falla en donde aparecen las singularidades. Esto ocurre con la teoría general de la relatividad en muchos casos.

Penrose probó que aplicando la métrica de Schwarzschild, que corresponde a un espacio-tiempo curvo, generado por una distribución esférica de masa sin rotación, el colapso gravitacional conduce a la formación de un agujero negro (AN) perfectamente esférico y sin rotación, cuyo tamaño depende solamente de su masa.

Antes de este resultado obtenido por Penrose sobre el colapso gravitacional de una estrella, se suponía que el colapso llegaba a un punto en el que se producía una especie de rebote de la materia e iniciaba un proceso de expansión, pero Penrose probó que esto no ocurre, si la masa de la estrella excede cierto valor.

A Hawking le fascinó el resultado obtenido por Penrose y lo impulsó al estudio de los agujeros negros, con lo que inician una colaboración sobre el estudio de las condiciones que se requieren para la presencia de singularidades en las ecuaciones de Einstein. Lo que encontraron fue que estas resultan ser una característica general de la relatividad de Einstein y no simples casos aislados, como en su momento, este último, trató de explicar.

LOS AGUJEROS NEGROS

Las ideas asociadas actualmente con los (AN) se remontan a la época de la física Newtoniana. En el año de 1796 el físico y matemático francés Pierre-Simon Laplace usando la mecánica Newtoniana y la teoría de la gravitación universal del mismo Newton, realizó cálculos para determinar la velocidad de escape de un objeto astronómico. A partir de esto, encontró que podía existir un tipo de estrella de la que no podía escapar ni la luz. A éstas les llamó Estrellas Congeladas. No hubo más interés en estos objetos y el asunto quedó solamente como una curiosidad matemática.

Posteriormente, en 1939 Robert Oppenheimer, al resolver las ecuaciones de campo gravitacional de Einstein obtuvo que si la masa de una estrella excede cierto valor, un poco más de dos veces la masa del Sol, la fuerza gravitacional adquiere valores tan grandes que no permite el escape de nada, ni de la luz. Dejó este resultado sin dedicarle más comentarios, ya que consideró que no tenía ningún sentido o era algo imposible de observar en la naturaleza. Los detractores de Oppenheimer algún tiempo después, dijeron que él era bueno para hacer cálculos, pero no tenía talento, ni intuición física para entender o interpretar los fenómenos. Otras opiniones atribuyen la falta de atención a este problema, al hecho de que sobrevino la segunda guerra mundial y Oppenheimer fue llamado para dirigir el Proyecto Manhattan, para fabricar la bomba atómica. El asunto quedó olvidado por los problemas que tuvo que afrontar después de que terminó la guerra.

El sorprendente resultado de Oppenheimer, producto de la relatividad general, no le pareció a Einstein, aun cuando su propia teoría contemplaba esa posibilidad, lo consideró sólo como un resultado matemático. Pensaba en el caso de la fuerza nuclear, que es atractiva, lo cual tiene que ser así para que se forme la estructura nuclear. Si no fuera así, la fuerza coulombiana repulsiva entre los protones impediría la formación de los núcleos atómicos. Sin embargo, para muy cortas distancias, la fuerza nuclear se vuelve repulsiva, si no ocurriera esto, los protones y neutrones en un núcleo se fundirían entre sí destruyéndose la estructura nuclear espontáneamente. Esta fuerza repulsiva es lo que Einstein pensaba que evitaría el colapso gravitacional. No puede la gravedad vencer a otras fuerzas más poderosas como la electromagnética o la nuclear, solía decir. En 1939, Einstein publica un artículo donde, con sus propias ecuaciones, trata de probar que los agujeros negros no pueden existir.⁵

Unos pocos meses después de esto, Oppenheimer y su estudiante Hartland S. Snyder publican un trabajo donde calculan cómo ocurre la formación de un AN.⁶

La teoría cuántica de campos es una estructura matemática que une a la mecánica cuántica y a la teoría especial de la relatividad. Con esta se estudian las partículas materiales más pequeñas, y los procesos de muy alta energía, en las que ellas intervienen. Al chocar dos partículas como estas, su acercamiento puede ser tan grande, que en la formulación matemática del problema se presente una singularidad, es decir, los resultados conducen a valores infinitos de ciertas cantidades. Los físicos evitan esto mediante un ingenioso procedimiento de “vestir” a las partículas, o rodearlas de otras partículas que se crean y se destruyen durante tiempos muy pequeños. A estas se les llaman partículas virtuales. No tienen existencia real, pero sus efectos son medibles en los experimentos. Estas se crean y autodestruyen, rodeando a todas las partículas subatómicas, formando una especie de nube a su alrededor. Estas partículas se originan del vacío mismo y se describen o interpretan como una nube que acompaña a todas las partículas. Parece algo muy arbitrario, pero este método de analizar los fenómenos del mundo subatómico, ha dado origen a las teorías físicas más precisas y complejas que ha creado la mente humana. En estas ideas se basa un resultado obtenido por Hawking, que será mencionado más adelante.⁷

Los AN negros no se pueden observar directamente ya que la radiación de Hawking, que se mencionará después, es muy débil y no es posible detectarla y estudiarla. Sin embargo, la existencia de un agujero negro se determina de forma indirecta, por los efectos que produce en su entorno. Grandes flujos de materia se dirigen velozmente hacia él y terminan absorbidos por una especie de sumidero que desaparece esta materia.

SINGULARIDADES EN LAS ECUACIONES DE EINSTEIN

Después de la segunda guerra mundial, otros científicos retomaron el tema de las estrellas que se colapsan. Penrose en 1965, interpretó el colapso gravitacional como una curvatura infinita del espacio-tiempo, lo cual equivale matemáticamente a una singularidad. Hawking fue aún más lejos y asoció el problema de la singularidad al big bang. Pensó que los orígenes del tiempo y el espacio corresponden a una singularidad de las ecuaciones de Einstein. En este

caso el big bang representa una singularidad del espacio-tiempo. Sin embargo, aunque esto parezca razonable debido a que es un estado atípico del cual no podemos saber nada, una teoría que presente este tipo de singularidades no puede ser una teoría completa.

Como resultado de estas observaciones la relatividad general se puso en entredicho. Algunos años después, en 1974, Hawking encontraría la salida a este problema. Era necesario incluir un elemento adicional que explicara qué sucede cuando la curvatura del espacio-tiempo tienda a infinito, es decir, en el colapso gravitacional del big bang. Se le ocurrió a Hawking que la mecánica cuántica debería combinarse con la relatividad general de Einstein, para poder tener resultados físicamente aceptables de estos fenómenos. Posteriormente se aclararán algunos conceptos derivados de estas ideas cuánticas aplicadas a la RG.

Antes de que se acuñara el término de agujero negro por John Wheeler en 1967, era muy difícil transmitir la idea de colapso gravitacional o la de singularidad del espacio-tiempo. No había palabras sencillas para explicar el fenómeno de curvatura infinita del espacio-tiempo. Cuando Wheeler introduce el nombre de agujero negro y explica la idea de que nada, ni luz puede salir de este objeto, el concepto se aclaró y fue más manejable para referirse a él

HORIZONTE DE EVENTOS

Para entender las ideas asociadas a los AN es conveniente introducir el concepto de Horizonte de Eventos (HE). Pensemos, para simplificar las ideas, que un AN es una esfera. El horizonte de eventos de un agujero negro es una frontera, esférica también, que separa el espacio-tiempo en dos regiones. Dentro de ella, todo lo que alcance esta región, ya no puede escapar. Fuera del horizonte de eventos, las partículas sí pueden escapar, si tienen suficiente energía. Cuando una estrella de una masa determinada agota su combustible nuclear y empieza a contraerse debido a la atracción gravitacional, se convierte en un agujero negro si su radio llega a tomar el valor correspondiente al del horizonte de eventos.

En el big bang la densidad de masa y energía era infinita. Nuevamente, un resultado de valor infinito para una cantidad física como la densidad de energía es, por supuesto, inaceptable. Encontramos que la teoría general de la relatividad fracasa al tratar el problema cosmológico del origen del universo.

Las ecuaciones de Einstein de la relatividad general contienen soluciones que predicen la existencia de objetos de enorme densidad, de donde no puede escapar nada, ni la luz. Es importante tener claro que la RG es una teoría muy distinta a otras teorías de campo. La teoría del campo electromagnético, por ejemplo, se describe en términos de los campos eléctricos y magnéticos evaluados en puntos del espacio-tiempo. Muy diferente a esto, es la teoría general de la relatividad que ella misma pone o da forma al escenario donde ella misma actúa.

La teoría general de la relatividad establece que la gravedad está descrita en términos de la geometría del espacio-tiempo. Por otra parte la geometría de un espacio de cualquier número de dimensiones, está determinado por la métrica de este espacio, es decir, por la manera de medir distancias en él. Con esto podemos establecer que la fuerza de gravedad no existe, lo que existe es la geometría del espacio-tiempo, determinada por la presencia de una distribución particular

de masa y de energía. El espacio-tiempo se curva en la vecindad de un cuerpo masivo, como una estrella. Resumiendo, la RG convierte en un problema de geometría el efecto físico de un campo gravitacional. Las trayectorias que siguen las partículas afectadas por este, son las geodésicas de ese espacio geométrico. Así que el concepto de fuerza gravitacional desaparece en la formulación de Einstein de la teoría de la gravedad.

Para resolver las ecuaciones de Einstein cuyas soluciones determinan la geometría del espacio-tiempo, correspondientes a una determinada distribución de masa, debemos por supuesto, dar esta distribución de masa y energía. Consideraremos aquí la más sencilla de todas, una distribución de masa esféricamente simétrica, como la de una estrella, que no gira y no tiene carga eléctrica.

La solución de las ecuaciones de Einstein correspondientes, determina la geometría del espacio-tiempo. Por otra parte, esta geometría queda determinada por la métrica, dada por ds^2 , que corresponde al cuadrado de la distancia entre dos puntos de ese espacio. Por ejemplo, en el espacio plano euclidiano de tres dimensiones, la distancia entre dos puntos muy próximos uno del otro está dada por

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

Esta expresión no es otra cosa más que el teorema de Pitágoras en tres dimensiones, que manejamos en la geometría analítica.

Por otra parte, el espacio de la teoría especial de la relatividad, es el espacio de Minkowski cuya métrica está dada por⁸

$$ds^2 = (cdt)^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (1)$$

Esta es la regla para medir distancias en este espacio.

Para entender lo que es un agujero negro, es conveniente introducir la métrica correspondiente, a las soluciones de las ecuaciones de Einstein del problema más simple, el de una distribución de masa M , esféricamente simétrica, sin carga y ni rotación. La solución es conocida como la métrica de Schwarzschild, que fue quien la obtuvo. Expresada en coordenadas esféricas con centro en la distribución de carga, esta métrica está dada por⁸

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 - r^2(d\theta^2 + \text{Sen}^2\theta d\varphi^2)$$

Donde G es la constante gravitacional, c la velocidad de la luz y r, θ y φ las coordenadas esféricas de un punto del espacio y t el tiempo.

Mediante un análisis de esta solución, considerando el movimiento de un rayo de luz, se obtiene que el radio del horizonte de eventos es

$$r = \frac{2GM}{c^2} \quad (2)$$

Una estrella que genere un espacio-tiempo con geometría descrita por la métrica de Schwarzschild se convertirá en un agujero negro, si en su colapso gravitacional, llega a tener un radio de este valor. El valor de r dado por la ecuación (2) define el radio del Horizonte de Eventos del agujero Negro de Schwarzschild. A la superficie de esta esfera con este radio se le conoce como horizonte de eventos. Según la teoría clásica de la relatividad, un objeto astronómico (una estrella) con un radio de este valor, no emite luz ni alguna radiación hacia el exterior.

EL TEOREMA DE LAS ÁREAS

La dinámica de los agujeros negros fue el centro de atención de Hawking. En el año de 1972 él publicó un artículo donde aparece lo que hoy se conoce como teorema de las áreas de Hawking.⁹

En este se establece que en cualquier proceso que tenga lugar en un agujero negro, que absorba materia o que colisione y se funda con otro agujero negro, el área total del horizonte de eventos nunca disminuye.

En general, si un sistema de varios AN interactúan entre sí, el área total del sistema nunca decrece, pero la masa total del sistema sí puede decrecer. Como ejemplo para ilustrar esta idea, consideremos dos AN de Schwarzschild de masas M_1 y M_2 , que se unen mutuamente dando una masa final M . Esta masa será menor que la suma de ambas, debido a que en el proceso de fusión de ambos hoyos negros, se emiten al espacio ondas gravitacionales que llevan energía, es decir, transportan masa. El área del nuevo agujero negro será $4\pi R^2$, la cual, como lo probaremos después, es proporcional a M^2 . De acuerdo con el teorema de las áreas, ésta será mayor que la suma de las dos áreas iniciales.

Pongamos un ejemplo numérico con un AN de Schwarzschild. Dos agujeros negros de masas 5 y 8 se funden formando un AN de masa 12, donde se ha expulsado al espacio energía equivalente a una unidad de masa, que es la masa faltante. El área del nuevo AN será proporcional a $12^2=144$. Mientras que el área total original era igual a la suma de las áreas, las cuales son proporcionales a los cuadrados de sus respectivas masas. El área inicial es proporcional a $5^2+8^2=89<144$. Observamos que el área total creció. Ésta es la esencia del Teorema de las Áreas de Hawking.

Este teorema inspiró a Jacob Bekenstein para relacionar la segunda ley de la termodinámica con los agujeros negros. Él había estado analizando lo que ocurre con la entropía, cuando un agujero negro absorbe materia del exterior. Razonaba de la siguiente manera: Si un objeto es absorbido por un AN, la entropía del exterior disminuye (debido a que en el exterior tenemos un sistema más simple). Por otra parte, para un observador externo al AN las únicas cantidades físicas observables allí son, masa, carga y momento angular, las cuales, en principio, no modifican la entropía. Encontramos entonces que se viola la segunda ley de la termodinámica, ya que la entropía total en el proceso señalado disminuye. Para recuperar la validez de esta ley, debemos asociar al AN una entropía y generalizarla. El nuevo enunciado sería: La entropía total es la suma de la entropía común, más la entropía del agujero negro.¹⁰ Bekenstein definió la entropía total como la entropía de la materia más la del agujero negro. Expresando esto matemáticamente como

$$S_{total} = S_{materia} + S_{AN} \quad (3)$$

El problema que se le presentó a Bekenstein fue cómo asociar una entropía al agujero negro. La guía la proporcionó el teorema de las áreas de Hawking. Combinando ideas, Bekenstein hizo la siguiente analogía: De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, en cualquier proceso la entropía total nunca decrece. Por otra parte, en los procesos que ocurren en los agujeros negros el área total del horizonte de eventos nunca decrece, entonces podemos asociar la entropía del AN con su área, es decir el área del horizonte de eventos.

En resumen, tenemos que en la segunda ley de la termodinámica $\Delta S \geq 0$, donde ΔS es el cambio de entropía en el proceso termodinámico que estamos considerando.

Por otra parte, en la dinámica de los agujeros negros $\Delta A \geq 0$, donde ΔA es el cambio en el área total del horizonte de eventos. Basado en estas analogías, y en un análisis termodinámico clásico de la situación, la asociación entre la entropía y el área de un agujero negro le pareció razonable a Bekenstein.¹⁰

Encontró que una hipótesis razonable para la entropía S_{BH} de un AN (el subíndice es por Black Hole) es

$$S_{BH} = \frac{1}{4} A \quad (4)$$

donde A es el área del horizonte de eventos.

Este fue su trabajo de tesis doctoral en Princeton en agosto de 1972. Bekenstein publicó el mismo año el artículo “Black Holes and the Second Law” donde establece que para conservar la validez de la segunda ley de la termodinámica, es necesario asociarle una entropía a los agujeros negros. A propósito y sólo como dato, Bekenstein (1947-2015) fue un físico que nació en la Cd. de México, pero vivió y estudió su carrera en EUA.

Por otra parte, el físico Werner Israel en 1967, probó un teorema que después fue extendido por John Wheeler, Penrose y Hawking. Este teorema se refiere a los AN y fue bautizado como “No Hair Theorem”, (Teorema sin pelo), una metáfora que ya se había usado antes para referirse a algo cuya descripción es muy simple. El teorema establece que los agujeros negros no son en realidad objetos complejos, sino muy simples ya que pueden ser descritos por, cuando mucho, tres cantidades, su masa, su momento angular y su carga. No importa la materia de la que están formados, ni otra información sobre su origen, su condición de agujero negro permite describirlo completamente con las tres cantidades mencionadas. Para observadores en el exterior del agujero negro, de acuerdo con la RG, no hay más información sobre este que las cantidades físicas mencionadas.

Los resultados de este teorema dieron argumentos a Hawking para invalidar la publicación de Bekenstein. Hawking argumentó que los agujeros negros tenían temperatura cero, y por lo tanto no tiene sentido asociarles una entropía o aplicarles la segunda ley de la termodinámica. Posteriormente, como veremos en la siguiente sección, Hawking le daría la razón a Bekenstein al encontrar una explicación cuántica al fenómeno.

La temperatura cero para un AN es un resultado directo de la Ley de Stefan-Boltzmann, ya que por definición un AN, de éste no sale ningún tipo de radiación y por lo tanto, de acuerdo con la Ley de Stefan-Boltzmann

$$\rho = aT^4 \quad (5)$$

Siendo ρ el flujo de energía de radiación emitida por un cuerpo, a una constante y T la temperatura de éste. Puesto que por definición de AN $\rho=0$ entonces, $T=0$, por lo tanto, no tiene sentido asignarle al AN una entropía.

RADIACIÓN DE HAWKING

Hawking y su colaborador Brandon Carter escribieron un ensayo criticando fuertemente a Bekenstein por haber degradado su teorema de las aéreas, usándolo

en un problema donde era absurdo aplicarlo pero, aun cuando Hawking no aceptó las ideas de Bekenstein, se puso a investigar lo que podría ocurrir si sus ideas fueran correctas.

Analizando el problema, pensó que la solución estaba en la teoría cuántica. Fue así como a partir de 1973 se interesó por los efectos cuánticos en un campo gravitacional, algo que no había sido intentado antes.

El principio de incertidumbre de Heisenberg es uno de los elementos fundamentales de la mecánica cuántica. Hawking estudió el efecto que este principio tendría en el intenso campo gravitacional que rodea a un AN cerca del horizonte de eventos. De acuerdo con la mecánica cuántica se deberían producir pares partícula-antipartícula constantemente en esta región. Una partícula que escapa lleva energía del campo a partir del cual se creó. Esta energía corresponde a parte de la masa del AN, la cual disminuye al escapar de él la partícula. Las partículas creadas de esta manera son virtuales, creadas por fluctuaciones del vacío cuántico, estas se vuelven reales (no se recombinan) al tomar energía del intenso campo gravitacional que existe fuera del horizonte de eventos, pero muy cercano a él.

Estas ideas se pueden establecer de una manera más formal.

Una relación característica de la teoría de la relatividad es la relación entre la masa y la energía

$$E = mc^2 \quad (6)$$

Por otra parte, tenemos las Relaciones de Incertidumbre de Heisenberg, características de las teorías cuánticas

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$
$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (7)$$

De la ecuación (6), con $c = \text{cte}$

$$\Delta E = (\Delta m)c^2 \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación (8) en la relación (7), obtenemos

$$\Delta m \geq \frac{\hbar}{2c^2 \Delta t} \quad (9)$$

Esta relación nos indica que es posible crear una cantidad de masa Δm , que satisfaga la relación (9) durante un intervalo de tiempo Δt . Si este es muy pequeño, podemos crear pares de partícula-antipartícula, donde la suma de sus masas es Δm . Al par de partículas creadas se les llama partículas virtuales. En general, estas pueden materializarse si logran tomar la energía suficiente de alguna fuente donde ocurra el proceso.

Si un par de estas partículas se crea en la vecindad del horizonte de eventos, pueden convertirse en partículas reales al tomar energía del intenso campo gravitacional que rodea al agujero negro. Esto es lo que predijo Hawking, encontrando que los AN sí irradian energía y aceptó las ideas de Bekenstein sobre la termodinámica sobre los mismos.

TEORÍA CUÁNTICA DE LA GRAVEDAD

La fama mundial de Hawking como científico inició en 1974, cuando asombró a la comunidad científica internacional con la publicación de un artículo donde

prueba que los agujeros negros pueden emitir radiación, lo que él había descartado completamente desde la definición de agujero negro.

Probó que esto lo hacen de manera permanente hasta “evaporarse” completamente terminando en una explosión. Por lo tanto, las ideas anteriores a este descubrimiento de que los agujeros negros no pueden emitir ningún tipo de radiación y de que los agujeros negros no sufren evolución, fueron descartadas. Se concluyó que los agujeros negros, nacen y mueren al emitir radiación.

En contraposición con el teorema de no-pelo, después del descubrimiento de Hawking de que los AN pueden radiar se dijo que lo AN “sí tienen algunos pelos”. La expresión “evaporación de los agujeros negros” es usada comúnmente para designar este fenómeno.

La teoría de Einstein de la gravedad es incompatible con la mecánica cuántica ya que en ésta el principio de incertidumbre impide que la energía y el momento sean determinados con precisión absoluta. Contrariamente, la RG requiere que la energía y el momento sean determinados con absoluta exactitud en cada punto del espacio-tiempo.

Sin embargo, el fenómeno de la radiación de Hawking, involucra una combinación de mecánica cuántica y relatividad general o gravitación. Es el primer fenómeno donde se conjugan ambas teorías dando origen a la posibilidad de formular una teoría cuántica de la gravedad, lo cual dicho sea de paso, no se ha logrado hasta hoy. No obstante, la “evaporación” de los agujeros negros, es una idea aceptada actualmente por los especialistas en el tema.

TERMODINÁMICA DE LOS AGUJEROS NEGROS

De acuerdo con Bekenstein, la entropía es proporcional al área del horizonte de eventos del AN. El área del horizonte de eventos para un AN de Schwarzschild está dada por

$$A = 4\pi r^2 \quad (10)$$

el radio del horizonte de eventos del AN se obtiene de la ecuación (2), obtenemos

$$A = 16\pi \left(\frac{G^2}{c^4}\right) M^2 \quad (11)$$

donde M es la masa del AN.

Derivando esta función respecto a la masa, que es la única variable junto con el área, obtenemos

$$dA = 32\pi \left(\frac{G^2}{c^4}\right) M dM \quad (12)$$

Por otra parte, de $E=Mc^2$

$$dE = c^2 dM \quad (13)$$

Sustituyendo la ecuación (13) en la ecuación (12), obtenemos

$$dA = 32\pi \left(\frac{G^2}{c^4}\right) M \frac{dE}{c^2} \quad (14)$$

Por otra parte, de las relaciones termodinámicas tenemos que para un volumen constante,

$$dE = T dS \quad (15)$$

donde T y S representan la temperatura y la entropía, respectivamente, del AN.

Sustituyendo la ecuación (15) en la ecuación (14) se obtiene

$$dA = 32\pi M \left(\frac{G^2}{c^4}\right) \frac{1}{c^2} T dS \quad (16)$$

Por otra parte, de la ecuación (4), obtenemos

$$dA = 4dS_{BH} \quad (17)$$

Donde el subíndice de la entropía del AN en la ecuación (17) lo podemos eliminar.

Sustituyendo la ecuación (17) en la ecuación (16), obtenemos

$$4dS = 32\pi M \left(\frac{G^2}{c^4}\right) \frac{1}{c^2} T dS$$

Obteniendo la temperatura de un AN igual a

$$T = \frac{c^6}{8\pi M G^2} \quad (18)$$

Esta es la temperatura asociada a un AN, se le conoce como Temperatura de Bekenstein-Hawking y se escribe como T_{BH} . Casualmente el subíndice coincide con las iniciales de Black Hole.

La ecuación (18) tiene la forma

$$T = cte \left(\frac{1}{M}\right) \quad (19)$$

Cuanto mayor es la masa del AN, menor es la temperatura.

Sustituyendo la Ley de Stefan-Boltzmann dada por la ecuación (5)

en la ecuación (19) obtenemos que

$$\rho = cte \left(\frac{1}{M}\right)^4$$

cuando $M \rightarrow 0$, tenemos que $\rho \rightarrow \infty$.

El agujero negro al irradiar pierde masa y lo hace cada vez más rápidamente terminando en forma explosiva, ya que ρ es el flujo de energía irradiada por el agujero negro.

MINI-AGUJEROS NEGROS

Hawking introdujo la idea de que existen AN diminutos que se crearon durante el big bang y que pueden recrearse en procesos de colisiones a muy alta energía, como los que se dan en un acelerador como el LHC. Estos mini-agujeros negros viven durante corto tiempo, ya que se “evaporan” muy rápido debido a su pequeña masa. Esta predicción no ha sido confirmada hasta ahora y queda como una especulación teórica. También los procesos generados por los rayos cósmicos, los cuales tienen energías muy elevadas, podrían crear estos mini-agujeros negros a partir de su gran energía, pero no hay evidencia de ellos.

UN ASUNTO COMPLEJO: EL ORIGEN DEL UNIVERSO

Hawking se interesó también por el estudio del origen del universo. Hasta antes de él lo mejor que se podía decir, es que su inicio está asociado a una singularidad del espacio-tiempo. Sin embargo, si queremos dar respuesta a la pregunta de cómo se inició, necesitamos una teoría que funcione (que no tenga singularidades) en el principio del tiempo.¹¹

La relatividad general tiene el problema de que cuando nos movemos hacia atrás en el tiempo, nos encontramos con una singularidad. Esta teoría claramente no resuelve el problema de cómo se inició el universo. Por otra parte, la idea de que el tiempo termina en un agujero negro, o de que el universo terminará en el big crunch (gran colapso) que es otra singularidad, tiene el mismo problema que la pregunta de hacia dónde va el universo.

Hawking observó que en un formalismo de tiempo real, donde el tiempo, representado por un número real, corresponde a una línea que se recorre en una sola dirección, nos lleva desde el big bang al big crunch: un principio y un fin, ambos correspondiendo a singularidades del espacio-tiempo, los cuales son resultados inaceptables físicamente.

Estas dificultades llevaron a Hawking y a Jim Hartle, un físico colaborador suyo, a proponer un formalismo de tiempo imaginario para estudiar el universo como un todo, usando relatividad general y mecánica cuántica.

Cuando se estudia la relatividad en el espacio de Minkowski aparecen singularidades en la métrica, debido a que la forma de medir distancias en el espacio-tiempo no es un cantidad definida positiva, como se puede ver de la ecuación (1). Cuando se introduce el concepto de tiempo imaginario, la métrica toma siempre valores positivos quedando un espacio euclidiano de cuatro dimensiones, cada punto determinado por las coordenadas (x,y,z,ct) , con una métrica como en la ecuación (1) pero con todos los signos positivos, sin singularidades. De esta manera el tiempo se convierte en la cuarta componente de un espacio Euclidiano de cuatro dimensiones, sin problemas de singularidades.

Si combinamos relatividad general y mecánica cuántica, el concepto de tiempo imaginario puede utilizarse como parte del modelo de la gravedad cuántica que conduce a que el universo no tuvo ningún origen ni tendrá ningún fin. En el modelo no hay singularidades, no hay puntos desconocidos que no podamos manejar. El universo se describe con una teoría mecánico cuántica donde no existe el principio ni el fin. El tiempo resulta ser un concepto cíclico, en un universo finito pero ilimitado, tanto en el espacio como en el tiempo. Esto significa que no hay bordes, ni en el tiempo ni en el espacio.

En su modelo cuántico de la gravedad Hawking introduce el concepto de tiempo imaginario, sustituyendo al tiempo real. Establece que la historia del universo es la historia del tiempo. En una representación del tiempo como número imaginario sobre la superficie de una esfera, o la representación del espacio-tiempo sobre una híper-superficie curvada de cuatro dimensiones, no encontramos fronteras ni espaciales ni temporales. Es decir, no hay un punto de esta superficie al que le podamos asociar el origen del tiempo. Pensamos en el polo sur como un punto del espacio-tiempo de dos dimensiones, desde donde iniciamos nuestro movimiento continuo sobre un meridiano hacia el polo norte. Cuando lleguemos al polo norte, iniciaremos nuestro movimiento hacia el polo sur y regresaremos nuevamente al polo sur. Como no hay nada más al sur de este punto, si este fuera el momento del big bang, entonces no hay nada antes del big bang.¹²

En el modelo de Hawking el principio del universo puede ser explicado por las leyes de la física cuántica y la relatividad general. Aquí se muestra una especie de teoría del todo, sin problemas de singularidades.

En síntesis: Si queremos describir el comportamiento del universo, necesitamos una teoría que sea regular (sin singularidades) para todos los valores del tiempo y del espacio. No hay pasado ni hay futuro. De esta manera, encontramos que el universo queda descrito por una teoría matemática consistente y completa. Con esto nos quedamos. Sin embargo este no es el fin del problema ya que la teoría cuántica de la gravedad todavía no se logra desarrollar. Es todavía el objetivo de los físicos, lo que en términos religiosos se conoce como la búsqueda de The Holy Grail, (El Cáliz Sagrado). Algo que deseamos intensamente, pero que es muy difícil de lograr.

Estamos en una situación muy parecida a la que se le presentó a los científicos con la teoría cuántica. El mundo cuántico, que es el mundo de los átomos y las partículas subatómicas, no es el mundo que observamos con nuestros sentidos. El mundo subatómico se explica con instrumentos, los que miden la presencia de un electrón o de un átomo. Es más sutil y extraño que nuestro mundo macroscópico, el cual conocemos por nuestros sentidos. Así mismo, al considerar el universo como un todo, necesitamos introducir ideas cuánticas para evitar la presencia de singularidades.

Por otra parte, en otras teorías de campos cuánticos se crean partículas asociadas con los campos, aquí en la relatividad general se crearían partículas de espacio-tiempo. Con esto se granularía el tiempo y el espacio. Habría cuantos de tiempo y cuantos de espacio, es decir, intervalos de tiempo y espacio mínimos.

Las condiciones iniciales para el universo, lo que ocurrió al tiempo cero, son todavía desconocidas, así como también las ideas para referirnos al origen del universo resultan ser insuficientes por ahora. Se piensa que se necesita una nueva idea que rompa los actuales paradigmas. Se habla de que se requiere un nuevo principio fundamental en la física, que está esperando que lo encontremos para explicar el origen del universo. Por el momento, el instante más cercano al que podemos aproximarnos en el origen del universo es 10^{-44} segundos, que es llamado el Tiempo de Planck. Para tiempos menores que el tiempo de Planck, la física que tenemos falla y deja de tener validez. Para estudiar y entender los fenómenos a esta escala de tiempo, se requiere una teoría cuántica de la gravedad. Es por esto que el gran reto que tiene la física actual es el de lograr cuantizar la gravedad.

SU LEGADO CIENTÍFICO

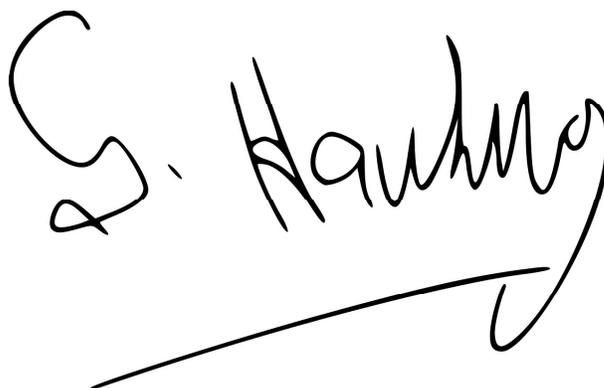
Hawking abrió nuevas líneas de investigación en la astrofísica y la cosmología. Fue generador de grandes ideas en estos campos, donde su trabajo sobre la física de los agujeros negros está considerado entre los más destacados en el área. Aplicando los métodos de la teoría cuántica de campos en presencia de intensos campos gravitacionales (espacio-tiempo curvo), obtuvo como resultado que los agujeros negros deben ser emisores de radiación. Esta debe ser equivalente a la radiación de cuerpo negro, cuya expresión matemática encontró Planck en el año 1900.

Investigó el problema de las singularidades de la teoría general de la relatividad, para explicar la formación de los agujeros negros y el origen del universo. Sentó las bases para el desarrollo de una teoría cuántica de la gravedad, inició la cosmología cuántica y abrió el camino hacia una Teoría del Todo.

Fue también un gran divulgador de la ciencia. Su libro Breve Historia del Tiempo, donde explica brillantemente ideas sobre el cosmos, fue un éxito literario mundial que lo convirtió en el científico más conocido del mundo. Con este libro inspiró a muchos jóvenes en el mundo para interesarse en los problemas cosmológicos.

REFERENCIAS

1. Roger Penrose, Gravitational Collapse and Space-Time Singularities, Physical Review Letters. 14 (3) (1965).
2. Stephen Hawking, Breve historia del tiempo, Editorial planeta, (1992).
3. Stephen Hawking, Agujeros negros y pequeños universos, Editorial planeta, (1994).
4. Michael White and John Gribbin, A life in science, The Joseph Henry Press, (2002).
5. Jeremy Berenstein, Scientific American, April 1, 2007.
6. J. R. Oppenheimer and H. Snyder, On Continued Gravitational Contraction, Phys. Rev. 56, 455 – Published 1 September 1939.
7. Brian Greene, The elegant universe, Vintage Books, (2000).
8. Bernard F. Schutz, A first course in general relativity, Cambridge University Press, (2002).
9. S. W. Hawking, Phys. Rev. Lett., 26, 1344 (1971); Comm. Math. Phys., 25, 152 (1972).
- 10 Roger Penrose, El Camino a la realidad, Debate, (2007).
11. Stephen Hawking, The European Physical Journal, H, (2014). DOI:10.1140/epjh/e2014-50013-6.
12. Carlip, S. Black Hole Thermodynamics, 2017. DOI: 10.1142/9789814678506_0010.

A handwritten signature in black ink that reads "S. Hawking". The signature is written in a cursive, fluid style. Below the signature, there is a long, horizontal, slightly curved line that extends across the width of the signature.