





EL IMPACTO CIENTÍFICO DEL TRABAJO DE STEPHEN HAWKING

CS J. Rubén Morones Ibarra

INTRODUCCIÓN

Stephen Hawking, considerado uno de los científicos más notables en los campos de la cosmología y la astrofísica de los últimos cincuenta años, nace en la ciudad de Oxford, Inglaterra el 8 de enero de 1942 en el seno de una familia de clase media. Su vida constituye un ejemplo de tenacidad, de optimismo y entrega a la actividad científica, lo cual ha sido motivo de inspiración para muchos jóvenes que se han inclinado por estudiar carreras científicas.

Algo que debemos admirar de Hawking, además de su obra intelectual, es que a pesar de su condición física que lo mantuvo postrado en una silla de ruedas durante gran parte su vida, amó la vida intensamente y fue un apasionado de su trabajo. Sus logros científicos y la admiración que el mundo sentía por él constituían el acicate para que siguiera trabajando arduamente. Fue incansable en sus actividades académicas manteniéndose activo en su trabajo hasta el final de su vida.

Hawking, quien murió en Cambridge Inglaterra el 14 de marzo de 2018, ha sido uno de los científicos más influyentes en la cosmología y la astrofísica modernas. Su trabajo es considerado de gran relevancia para la comprensión de la física de los agujeros negros, así como también del origen del universo y su evolución. El impacto de su obra científica y sus ideas han tenido también consecuencias importantes en el desarrollo posterior de la física teórica.

Su trabajo científico está basado en la Teoría General de la Relatividad (TGR) que Einstein publicó en 1915 y a la que Hawking contribuyó con importantes ideas que dieron origen a nuevos campos de investigación en esta y otras ramas de la física.

Durante mucho tiempo, después de las confirmaciones observacionales de sus predicciones teóricas en los años posteriores a su publicación en 1915, hasta principios de la década de 1960, la TGR permaneció apartada del resto de los campos de la física, sin tener ningún avance significativo. Los físicos relativistas se mantenían aislados con muy poca comunicación científica con los físicos de otras áreas. Parecía que esta teoría ya había agotado sus resultados interesantes y que ya no había casi nada novedoso que se pudiera obtener de ella. Sin embargo, en el año de 1964 el matemático británico Roger Penrose introdujo en la teoría nuevas técnicas matemáticas que la revitalizaron. Este hecho fue considerado como una resucitación de la relatividad general. Estas contribuciones han sido consideradas como los más grandes logros en la relatividad general y en la física



matemática después de la publicación de esta teoría. Su impacto en la TGR fue inmediato pues a partir de ellos se empezaron a generar nuevos resultados que arrojaron luz sobre el origen del universo y el colapso gravitacional, dos problemas fundamentales de la TGR.

Penrose aplicó sus técnicas a los agujeros negros (AN) obteniendo nuevos e interesantes resultados. Hawking en su época de estudiante de doctorado dominó las técnicas desarrolladas por Penrose y las aplicó al universo como un todo. Los resultados de esta investigación los incorporó en el trabajo de su tesis doctoral, la cual defendió en el año de 1966, con el título "Properties of expanding Universes" ("Propiedades de los universos en expansión").

Penrose y Hawking establecieron una colaboración donde propusieron nuevos modelos matemáticos que los llevaron a establecer varios teoremas en el campo de la relatividad general. Sus conclusiones fueron que las singularidades en la teoría de la relatividad general son inevitables. Esto convirtió a la TGR en una teoría incompleta. Este resultado representó un gran avance en la TGR, de donde surgieron una serie de resultados que llevaron a Hawking a probar varios teoremas sobre agujeros negros. Con esto se abrieron nuevos campos de investigación en la física, entre los cuales encontramos la termodinámica de los AN, la teoría cuántica de la gravedad, la cosmología cuántica, la teoría de la información cuántica, las computadoras cuánticas, la geometría cuántica y el concepto de universo holográfico. En todos estos campos se desarrolla actualmente una intensa actividad de investigación.

LAS SINGULARIDADES DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL

Hawking era una persona que se proponía metas muy ambiciosas. Pensaba siempre en grandes proyectos intelectuales. El trabajo de Penrose lo inspiró para buscar comprender y a la vez realizar aportaciones al conocimiento que permitan explicar la manera en la que funciona el universo. Cuando Penrose presenta lo que hoy se conoce como primer teorema de la singularidad, Hawking mostró un gran interés en este tema⁴.

Antes de 1960 muchos científicos no aceptaban la idea de la existencia de los AN. El mismo Einstein había dicho que este solo era un resultado matemático de su teoría, pero que no podía presentarse en la naturaleza debido a la influencia de otras fuerzas repulsivas más intensas que la gravedad que evitarían el colapso gravitacional. Entre estas fuerzas estaría la fuerza nuclear que es repulsiva a distancias muy cortas.

El concepto de singularidad es fundamental para entender lo que ocurre en un AN o en el inicio del universo. En general, una ecuación diferencial tiene una singularidad cuando existe un valor de la variable independiente para la cual uno de los términos de la ecuación queda indeterminado. En la TGR la estructura matemática de la teoría está determinada por 10 ecuaciones diferenciales parciales no-lineales. Las soluciones de estas ecuaciones diferenciales determinan la curvatura del espacio-tiempo.

El origen de las singularidades en la TGR se debe a la presencia de densidades de masa o energía infinitas.



Figura 1.- Roger Penrose, físico-matemático británico con quien Hawking colaboró en varios proyectos científicos.

Esto provoca que las soluciones de las ecuaciones de Einstein lleven a valores de curvatura infinita. Esto se expresa también diciendo que existen puntos o regiones donde la superficie del espacio-tiempo es no diferenciable, o que contiene picos (que la superficie no es suave).

Otra forma de definir una singularidad es estableciendo que esta se presenta donde el tensor métrico no está definido o que no es diferenciable. Desde el punto de vista de la física interpretamos una singularidad como un punto o una región del espacio donde el tiempo se detiene, y las leyes de la física ya no son válidas. Estas ideas son suficientes para los propósitos que aquí se persiguen, que son los de mostrar que la TGR es una teoría incompleta o deficiente debido a que no puede evitar la presencia de singularidades.

Como ya ha ocurrido en el pasado con la mecánica Newtoniana, por ejemplo, seguramente nuevos desarrollos matemáticos nos mostrarán que la TGR es solo una aproximación a una teoría más completa que nos permitirá tener una visión más profunda de los fenómenos del cosmos.

La existencia de singularidades en la TGR tiene efectos importantes o desastrosos para la cosmología y la astrofísica. Para entender lo que sucede en un AN o en el origen del universo, Penrose y Hawking desarrollaron nuevas técnicas matemáticas que probaron la inevitabilidad de las singularidades en la TGR. Estos resultados son impactantes porque muestran que todo colapso gravitacional conduce a una singularidad del espacio-tiempo. Esto es lo que ocurre en los AN.

Un concepto importante para estudiar los AN es el de Horizonte de Eventos (HE). Este se define como una superficie que rodea a un AN y que separa el espacio en dos regiones: la interior, de donde ya no puede escapar nada, ni siquiera la luz, y la exterior de donde solo la masa, la carga eléctrica y la rotación del AN pueden observarse.

El fenómeno del colapso de una estrella por el efecto gravitacional para convertirse en un AN es impresionante debido a que, como ya se mencionó, el tiempo se congela, es decir, el tiempo se detiene. Esto es el significado de una singularidad en el espacio-tiempo. Si un observador externo observa un reloj cercano al HE, en la región exterior, por supuesto, verá que el tiempo se detiene, el reloj no marcha, el tiempo no transcurre. La TGR falla o deja de tener validez. Sin embargo, el observador externo no ve la singularidad, solo el AN. El observador externo podrá seguir observando los fenómenos físicos fuera del AN, explicándolos con la TGR, fuera del HE, pero no en la región interior del AN, donde está la singularidad. En el interior del HE las teorías de la física que hoy tenemos, como la TGR no tienen ya validez.

Hawking reflexionó sobre lo que ocurre en un AN buscando aplicar las ideas de Penrose al universo. Su reflexión se centro en la idea de que si el universo se está expandiendo, esto implica que en el pasado, en el momento del big bang, toda la materia y la radiación debieron estar concentradas en un punto, lo que implica una singularidad del espacio-tiempo. Pero esta no es una singularidad de destrucción del espacio-tiempo como en un AN sino, en este caso, de creación de espacio-tiempo. Esta resultó ser una de sus grandes ideas que le permitieron aportar nuevos conocimientos sobre el origen del universo.

EL IMPACTO DEL TRABAJO DE HAWKING EN LA FÍSICA MODERNA

La especialidad de Hawking fue la teoría de la relatividad general orientada hacia el estudio de la cosmología y la astrofísica, donde realizó enormes aportaciones. En ambos campos incorporó las ideas cuánticas, dando origen a la cosmología cuántica y la astrofísica cuántica. El impacto de sus ideas y sus trabajos transformó el estudio de estas áreas de la física. Se citan enseguida algunos ejemplos del efecto

de sus contribuciones al conocimiento de nuestro universo.

LOS AGUJEROS NEGROS NO SON ETERNOS

Antes de Hawking se pensaba que un agujero negro una vez que se formaba se mantenía creciendo y aumentando su masa engullendo todo lo que existía a su alrededor. De acuerdo con la TGR el AN permanecía eternamente en el universo. Sin embargo con las aportaciones de Hawking sobre el comportamiento físico de los AN se ha llegado a la conclusión de que estos se evaporan y terminan en una explosión desapareciendo como tales. Estas ideas fueron tan revolucionarias en la física que provocaron una cascada de nuevos conceptos, nuevos problemas y nuevos descubrimientos². El cálculo estimado para la vida de un agujero negro de una masa equivalente a dos masas solares es de 10^{70} años. Una cantidad increíblemente grande, que escapa a la posibilidad de imaginarla. De acuerdo con los cálculos se estima que la edad del universo es de 10^{10} años así que la vida de un AN excede por mucho a la edad del universo.

IMAGEN DE UN AGUJERO NEGRO

En la imagen de abajo se muestra la primera visualización fotografía de un agujero negro de los que se conocen como supermasivos por su enorme masa. Este AN está localizado en el centro de la galaxia M87 (Virgo A). Lo que se observa no es propiamente una fotografía sino una imagen creada por un conjunto de ocho telescopios colocados en diferentes lugares de la Tierra. Este logro científico es parte de un programa internacional denominado Event Horizon Telescope (EHT), donde participan más de 200 investigadores de todo el mundo, y cuyo propósito era precisamente este, captar la imagen de un agujero negro. Cada telescopio registra una enorme cantidad de datos capturando ciertos aspectos de la radiación total emitida por el gas que rodea al AN.

Para capturar esta imagen se requirieron seis días de observaciones durante el mes de abril de 2017 y ocho potentes telescopios colocados en diferentes lugares alrededor del mundo. Se estima que su masa

Figura 2.- Imagen de un agujero negro captada por ocho poderosos telescopios que integraron las imágenes de cada uno de ellos dando como resultado la que se muestra.

es de alrededor de seis mil quinientos millones de veces la de nuestro Sol.

Un agujero negro es invisible, ya que de él no escapa absolutamente nada, ni la luz. Sin embargo, fuera del horizonte de eventos, en las inmediaciones de este, se genera una intensa actividad que se ve como una mancha brillante alrededor del agujero negro. El brillo se debe al vertiginoso remolino de gas ardiente que gira alrededor del AN y que emite una intensa radiación antes de precipitarse en él. El centro de color negro corresponde a la región encerrada por el horizonte de eventos (la frontera del AN) que constituye propiamente el agujero negro. La imagen se dio a conocer en el mundo el 10 de abril de 2019. Se calcula que la distancia a la cual se encuentra es de 54 millones de años luz.

La imagen que es la primera que se ha tomado hasta ahora, es importante para la astrofísica y la física debido a que ayudará a entender que es lo que ocurre

en los AN, lo cual es uno de los grandes misterios del universo. Se ha logrado con esta imagen lo que siempre se creyó que era imposible, capturar lo que ocurre en un agujero negro. La emoción del suceso fue muy grande debido a que era algo frustrante para los investigadores estudiar durante años estos objetos y pensar que nunca los llegarían a “ver”.

En realidad, a lo único que se puede tener acceso en estos cuerpos astronómicos es a lo que ocurre en el exterior del horizonte de eventos. Esta imagen será estudiada exhaustivamente para analizar los procesos físicos que tienen lugar en esta región. Con esta observación que constituye en sí un laboratorio celeste, se pondrá a prueba las predicciones de la TGR.

Lo que capturó el EHT fue en realidad la radiación emitida por las partículas que forman la corona exterior al AN las cuales se mueven a velocidades cercanas a la de la luz emitiendo radiación para posteriormente ser tragadas por el AN.

TERMODINÁMICA DE LOS AGUJEROS NEGROS

En el año de 1967 se probó un teorema sobre los AN que establece que un AN se describe completamente mediante tres cantidades: su masa, su carga eléctrica y su momento angular. El físico Jacob Bekenstein, basado en el teorema de las áreas de Hawking estableció que en todo AN hay información oculta, la cual está asociada con la entropía y ésta es proporcional al área del HE del AN. Hawking explicó el fenómeno introduciendo ideas cuánticas por primera vez en la TGR. El trabajo impulsó cambios en las leyes de la termodinámica para estar en concordancia con los fenómenos teóricos recién descubiertos que ocurren en los agujeros negros. La segunda ley de la termodinámica establece que en cualquier proceso que ocurra en la naturaleza la entropía total del universo nunca decrece. Matemáticamente se escribe como $\delta S \geq 0$ donde S es la entropía total del universo. En presencia de un agujero negro que absorbe materia de su entorno la segunda ley de la termodinámica escrita en esta forma ya no tiene validez. Debemos incluir la entropía del AN. Si llamemos a ésta entropía S_{BH} , tendremos que, de acuerdo con Hawking y Bekenstein la segunda ley de la termodinámica tomará la forma $\delta(S + S_{BH}) \geq 0$.³

Su artículo sobre la radiación de los AN publicado en la revista Nature en 1974 abrió el camino para una nueva física, la termodinámica de los agujeros negros y la posibilidad de la unificación de la teoría cuántica con la teoría de la gravitación de Einstein.

ES NECESARIA LA MECÁNICA CUÁNTICA PARA EXPLICAR EL ORIGEN Y EVOLUCIÓN DEL UNIVERSO

Einstein no aceptaba la interpretación ni los resultados de la mecánica cuántica. Su famosa frase "Dios ni juega a los dados" se refería a su desacuerdo con la manera como la mecánica cuántica interpreta y describe los fenómenos de la naturaleza. Hawking que tenía la firme convicción de que solo integrando la mecánica cuántica y la teoría de Einstein se podía explicar el origen y evolución del universo, hizo una réplica a la frase de Einstein afirmando: "Dios no tan solo juega a los dados sino que hace trucos con ellos

escondiéndolos bajo la manga". Con esto mostraba su opinión de que las leyes de la mecánica cuántica son los que rigen los fenómenos del universo⁴.

Con la combinación de la mecánica cuántica y la relatividad general, Hawking buscaba explicar el origen del tiempo, durante el big bang, y salvar el fin del tiempo en los agujeros negros. Ambos extremos del tiempo solo podían evitarse, en el caso del origen del universo y explicarse en el caso de los AN, si se consideraba en la descripción del universo la mecánica cuántica⁵.

LA TEORÍA CUÁNTICA DE LA GRAVEDAD

La teoría actual de la gravedad es la teoría general de la relatividad de Einstein. Esta teoría describe los fenómenos a gran escala, como los que ocurren en el sistema solar, en las galaxias, en los agujeros negros, o los fenómenos cosmológicos, donde se estudia al universo como un todo.

Por otra parte, la teoría que describe los fenómenos en la escala opuesta, es decir aquellos que suceden a muy pequeñas distancias, en la estructura atómica y subatómica, es la mecánica cuántica. La inclusión de la interacción gravitacional entre las teorías cuánticas es lo que se conocería como teoría cuántica de la gravedad.

Para introducir la idea de la cuantización de la relatividad general, es conveniente primero presentar el proceso para el caso del campo electromagnético. La teoría cuántica del campo electromagnético cuantiza este campo, lo que significa que se asocia una partícula al campo. Esta teoría se conoce como electrodinámica cuántica y en ella el campo electromagnético es una partícula llamada fotón. Similarmente las otras teorías cuánticas de la interacción débil y la interacción fuerte asocian partículas o cuantas a los campos.

Dado que la relatividad general es una teoría donde el campo gravitacional corresponde a la geometría del espacio-tiempo, la cuantización del campo gravitacional corresponde a la "granulación" del espacio-tiempo. Con esto tendríamos que el espacio y el tiempo no son continuos sino que existen en paquetes de dimensiones que tienen un valor mínimo.



COSMOLOGÍA CUÁNTICA

Hawking dio un enorme impulso a la cosmología. Desarrolló la cosmología cuántica. Propone que el universo es finito pero sin límites. Con esto se evitan las singularidades y las leyes de la física tienen validez en todo el espacio y el tiempo incluido el momento del big bang, el cual ya no es considerado como una singularidad. Para soportar esta hipótesis se requiere introducir ideas cuánticas que rompan con la singularidad que la TGR predice durante el big bang⁶.

Hawking buscó demostrar que el origen del universo no se puede determinar porque aparece como una singularidad de las ecuaciones de Einstein. Esto significa que en sus orígenes el universo tenía una densidad de masa y energía infinitas. Un resultado inaceptable para cualquier teoría física. Por lo tanto la TGR es insuficiente para explicar el origen del universo. Hawking buscó dar solución a este problema introduciendo ideas cuánticas. Su postura fue siempre que solo cuantizando la gravedad se podía solucionar el problema de las singularidades de la TGR. Buscó muchas salidas al problema de las singularidades, entre ellas una propuesta donde introdujo un formalismo de tiempo imaginario. Fundamentalmente propone que en el inicio del universo este se encontraba en un estado cuántico. Las condiciones iniciales del universo siendo de naturaleza cuántica pudieron tener una fluctuación de donde todo brotó y condujo a nuestro universo actual. Aseguró que los teoremas sobre la inevitabilidad de las singularidades que él y Penrose probaron, son un fuerte soporte para la idea de que el universo se originó de un proceso cuántico. Muy probablemente de una fluctuación cuántica del vacío. Estas son algunas de las ideas que soportan a la cosmología cuántica. Debemos admitir nuestras limitaciones para explicar el origen del universo y aceptar que lo mejor que podemos decir es que el universo pudo haber surgido de una fluctuación cuántica del vacío.

DIVULGADOR CIENTÍFICO

Hawking fue un gran divulgador de la ciencia. Su gran habilidad para explicar conceptos científicos difíciles de una manera sencilla fue demostrada en su libro "Breve Historia del Tiempo". En este libro aborda el tema del origen y destino del universo, así como de los

agujeros negros. Con este libro, que ha sido traducido a más de 30 idiomas y del que se han vendido millones de copias, Hawking adquirió una popularidad mundial.

Su fama alcanzó niveles de una estrella del cine. Era consultado para múltiples temas de la ciencia y de la ciencia ficción, como los viajes en el tiempo, los extraterrestres, la existencia de Dios, la inteligencia artificial y el futuro de la humanidad. Además, sus conferencias eran muy concurridas, a ellas asistían personas de todos los niveles educativos.

Sus influyentes opiniones sobre múltiples aspectos cautivaron a sus audiencias, a editores de revistas y periódicos que publicaban sus ideas en las páginas principales de sus medios. Con esto se convirtió en el científico más famoso del mundo.

EPÍLOGO

Las contribuciones de Hawking a la ciencia fueron numerosas y sus trabajos sobre los agujeros negros y el origen del universo están entre las más notables aportaciones a la astrofísica y la cosmología de todos los tiempos. Se ha especulado que no obtuvo el Premio Nobel debido a que sus predicciones teóricas son difíciles de comprobar. Como sabemos, uno de los más importantes aspectos de una teoría física es que contenga resultados que involucren predicciones que puedan someterse a pruebas experimentales u observacionales. Sin embargo, en su trabajo de investigación "The Development of Irregularities in a single bubble inflationary Universe", Physics Letters B 115 (1982) pp. 295-297, Hawking propone algunas ideas que involucran la razón de expansión del universo. Los efectos de esto ya han sido observados por varios observatorios, entre ellos el "Cosmic Background Explorer" (COBE) un satélite construido para poner a prueba las predicciones del big bang. Por otra parte, el Premio Nobel no es otorgado post-mortem, solamente cuando el laureado fallece después de anunciado el premio.

Otra de sus predicciones es la de la posible existencia de mini-agujeros negros, los cuales probarían el fenómeno de la evaporación de los AN. Estos mini-agujeros negros no se han observado hasta ahora⁷.



REFERENCIAS

Stephen Hawking, Agujeros negros y pequeños universos, Planeta, 1999.

Richard Panek, The 4% UNIVERSE, Mariner Books, 2011.

Bekenstein J.D. Statistical black-hole thermodynamics, Physical Review D, 12, 3077 (1975).

<http://www.hawking.org.uk/does-god-play-dice.html>

Roger Penrose, El camino a la realidad, Edit. Debate, 2008, P. 1030.

Dan Falk, Universe on a T-Shirt, Arcade Publishing, 2004.

https://www.physicsoftheuniverse.com/topics_blackholes_theory.html



Figura 3..-Representación esquemática de la radiación de Hawking.