

# AGUJEROS NEGROS CUÁNTICOS Y EL EFECTO HAWKING

## QUANTUM BLACK HOLES AND THE HAWKING EFFECT

José R. Arenas<sup>1</sup>, Walter A. Pulido<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

<sup>2</sup>Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia.

(Recibido: 03/2019. Aceptado: 06/2019)

### Resumen

La noción de agujero negro cuántico se ilustra en el contexto de la Teoría de Campos Cuánticos sobre Espacios-Tiempos Curvos, con base en la consideración de efectos cuánticos en las vecindades de los agujeros negros. Para ello se introduce la imagen intuitiva de un agujero negro en el marco Newtoniano, complementada con la estructura causal de la Teoría de la Relatividad. En ese escenario se describe el efecto Hawking y la amenaza a la mecánica cuántica por la posible pérdida de información al interior de los agujeros negros. Finalmente se discuten las paradojas surgidas hasta hoy del matrimonio imposible entre la Relatividad General y la Mecánica Cuántica, claves para encontrar el camino a la gravedad cuántica.

**Palabras clave:** Agujeros negros, relatividad general, teoría cuántica de campos, información.

### Abstract

The notion of quantum black hole is illustrated in the context of Quantum Field Theory in Curved Spacetime, based on the consideration of effects quantum in the vicinity of black holes. For this, the intuitive image of a black hole is introduced in the Newtonian framework, complemented

by the causal structure of the Theory of Relativity. In this scenario, the Hawking effect and the threat to quantum mechanics are described due to the possible loss of information inside black holes. Finally, the paradoxes that have arisen until today about the impossible marriage between General Relativity and Quantum Mechanics, keys to find the path to quantum gravity, are discussed.

**Keywords:** Black holes, general relativity, quantum field theory, information.

## Introducción

Uno de los grandes misterios del comportamiento del universo es la naturaleza cuántica de la gravedad descrita por la curvatura del espacio-tiempo, que con el descubrimiento de las ondas gravitacionales, dejó de ser simple geometría para revelarse como campo que comparte propiedades con la materia. Conocer esa naturaleza íntima sería la clave que integraría consistentemente la Teoría General de la Relatividad y la Mecánica Cuántica. Quizá el escenario natural para buscar esa clave sea el reino de los agujeros negros, donde se conjugan necesariamente esos dos grandes pilares de la física moderna, el primero que conocemos un poco mejor en el dominio macroscópico y el segundo en las dimensiones microscópicas. Hasta ahora estamos aprendiendo a conocer los efectos cuánticos en el mundo macroscópico y los efectos de fondo de la gravedad en los dominios microscópicos. Justamente los agujeros negros son los laboratorios naturales para pensar integral y coherentemente estas dos teorías, desde el colapso de grandes estructuras por efecto de la gravedad, hasta los abismos de lo infinitamente pequeño de las incomprensibles singularidades, donde todo el universo cabría en un punto.

Una de las primeras aproximaciones exitosas de la Relatividad General y la Mecánica Cuántica ha sido la Teoría de Campos Cuánticos sobre Variedades Curvas. En otras palabras, el acercamiento entre la noción de gravedad con base en la curvatura del espacio-tiempo y la noción de materia recurriendo a la imagen del vacío como un potencial gigantesco generador de

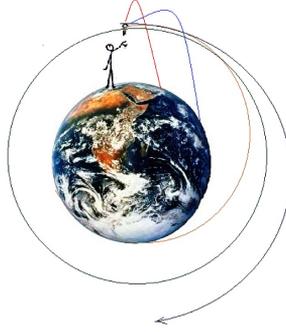
todas las partículas del universo. Hawking en 1974 logró el más grande efecto del acercamiento entre estos dos formalismos: la evaporación “*imposible*” de los agujeros negros [1]. De acuerdo con la Teoría General de la Relatividad, de las entrañas de un agujero negro no puede salir absolutamente nada, incluida la luz. Pero efectos cuánticos en las vecindades de estos monstruos colapsados “*contradicen*” la sentencia relativista. Quizá la comprensión de las contradicciones entre estas dos grandes teorías sea la clave para formular una teoría de la gravedad cuántica, en términos de los complementos desconocidos de cada una de ellas, donde se tenga una teoría integral coherente y efectiva de la “gravedad geométrica” y los campos cuánticos de partículas.

Este artículo hace una introducción al efecto Hawking en el contexto de los agujeros negros con correcciones cuánticas. Para ello se introduce la noción de agujero negro en el marco de la Teoría General de la Relatividad y luego la noción de vacío de los campos cuánticos, para finalmente mostrar el efecto de este matrimonio aparentemente imposible, con una breve discusión de los grandes interrogantes a los que estamos abocados hoy en día como una de las maravillosas motivaciones para estudiar el camino a la gravedad cuántica.

## 1. La naturaleza relativista de los agujeros negros

La noción de agujero negro puede intuirse con base en la gravitación Newtoniana [2]. Para ello es ilustrativo pensar en una plataforma de lanzamiento de masas, la cual puede ser un planeta de nuestro sistema solar. Objetos masivos lanzados desde allí, regularmente ascienden a una determinada altura y regresan, salvo que se les impulse con suficiente velocidad para que no regresen. A la mínima velocidad que habría de impulsarse un cuerpo para que no regrese se denomina *velocidad de escape* (ver figura 1).

La velocidad de escape depende de la masa de la plataforma de lanzamiento. Para la Tierra esa velocidad es de 11.2 km/segundo. Con respecto al Sol que tiene una masa mayor, esta velocidad es aproximadamente 600 km/segundo. En el caso de una masa menor, como la Luna, esa velocidad es de 2.4 km/segundo. La velocidad de

FIGURA 1. *Velocidad de escape*

escape  $v_e$ , de acuerdo con la relación sencilla de Newton

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}, \quad (1)$$

depende de la constante de la gravitación de Newton  $G$ , la masa  $M$  de la plataforma de lanzamiento y el radio  $R$  de esta masa cuando se considera casi esférica. Todo esto quiere decir que a mayor masa de lanzamiento, mayor velocidad de escape, pero también depende inversamente del radio de la masa. Si el radio se hace menor, la velocidad de escape se hará también mayor. Como no se conoce nada que transporte energía e información y que viaje a una velocidad superior a la velocidad de la luz, puede ocurrir lo siguiente: si la masa  $M$  se contrae, con un aumento de su densidad, como ocurre con una estrella al final de sus días, cuando se le acaba su combustible nuclear, la velocidad de escape aumenta y llega a ser posible que esta velocidad de escape sea igual a la velocidad de la luz. Entonces, sería imposible que de allí pudiese salir algún cuerpo.

Con estas consideraciones se puede introducir una imagen simple de *agujero negro*: una región del espacio generada por un colapso gravitacional tal que después de una cierta frontera no dejaría escapar absolutamente nada [3]. A ese límite de no retorno al resto del universo se le llama *horizonte de eventos*, lo cual no es otra cosa que la superficie última de escape cuando  $v_e$  llega a ser exactamente la velocidad de la luz.

La imagen introducida arriba es una buena aproximación conceptual al objeto misterioso que queremos entender, pero no es general, deja fuera de su alcance a la luz, por ejemplo. Ocurre que a los componentes de la luz no se les puede tratar como si fuesen simples piedras. No se puede aplicar la fórmula anterior de la velocidad de escape porque la luz no tiene masa. Esa imagen sencilla puede generalizarse con la ayuda de la Teoría de la Relatividad.

Einstein inicialmente desarrolló una teoría relativista para laboratorios con movimiento uniforme que se ha denominado Teoría Especial de la Relatividad, la cual posteriormente fue bellamente convertida en geometría por el matemático Hermann Minkowski. Es decir, todos los eventos de la naturaleza se pueden ubicar en una cuadrícula, que se denomina espacio-tiempo de Minkowski, representado en la figura 2.

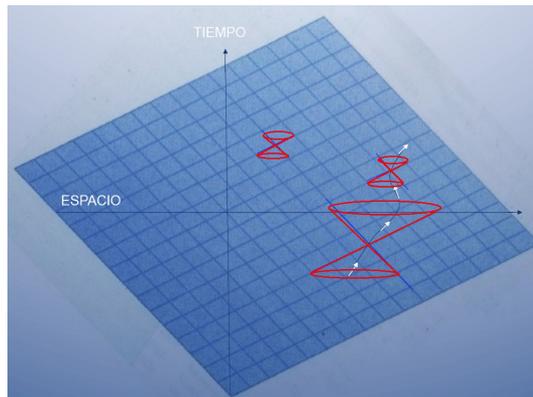


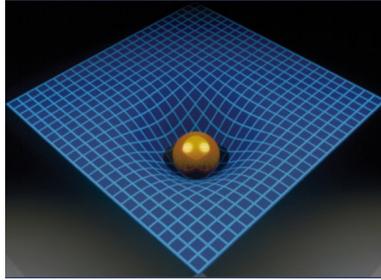
FIGURA 2. *Espacio-tiempo de Minkowski.*

Esta cuadrícula, grosso modo, se puede ver como las calles y carreras de una ciudad, donde las líneas horizontales representan el espacio (si por simplicidad se reducen sus tres dimensiones espaciales a una), y las líneas verticales corresponden al transcurrir del tiempo. Así, el evento encuentro de dos personas, queda bien establecido si se conoce el lugar y el instante del encuentro, lo cual se ubica en la intersección de dos líneas de la cuadrícula [2]. En la representación intuitiva de calles y carreras, el desplazamiento de la luz corresponde a líneas diagonales que conforman otra cuadrícula, cuya intersección con estas calles y carreras forman ángulos de

45 grados sexagesimales, conocida como la estructura causal del espacio-tiempo Minkowskiano. Y a los cortes en cruz en cada punto se denominan *conos causales* del punto. Estos diagramas nos dicen qué trayectorias son posibles y cuáles no, para los diferentes cuerpos del universo. Con respecto a un punto cualquiera del espacio Minkowskiano, un rayo de luz emitido desde allí se podrá mover únicamente por las dos líneas diagonales que definen el cono causal. Si el objeto móvil tiene masa, se debe mover con velocidades menores que la velocidad de la luz, lo cual corresponde a caminos al interior de los conos causales. Con las mismas propiedades se observa que no es posible viajar por la parte externa a los conos causales, porque ello implicaría viajar a velocidades mayores que la velocidad de la luz, lo cual es imposible de acuerdo a la observación y a las leyes de la electrodinámica. Es fácil llegar a estas conclusiones haciendo una división sencilla: si se toma la velocidad de la luz como la unidad, al dividir la distancia espacial sobre el tiempo, resulta una velocidad que es menor que uno para el interior de los conos y mayor que uno para el exterior de estos. En resumen, lo que significa esta estructura causal de la Teoría Especial de la Relatividad es la imposibilidad de viajar al pasado.

Los laboratorios naturales casi siempre son escenarios acelerados, realidad que llevó a Einstein a generalizar su primera teoría relativista. Además, la gravitación Newtoniana parecía violar la Teoría Especial de la Relatividad, puesto que esta interacción gravitacional actúa a distancia instantáneamente; comportamiento contrario a lo que se espera en una teoría relativista donde las interacciones no pueden viajar a velocidades mayores que la velocidad de la luz. Después de pensar con experimentos mentales, Einstein descubrió que las masas interactúan gravitacionalmente a través de distorsiones del espacio y el tiempo. El espacio de Minkowski se deforma cuando hay masas y elimina el fantasma de la acción a distancia (ver la figura 3). Técnicamente la distorsión mencionada es curvatura del espacio-tiempo, o deformación de la estructura causal Minkowskiana.

Con la imagen de la estructura causal descrita arriba se puede hacer un modelo gráfico de la naturaleza de un agujero negro: imagínese una masa completamente esférica en colapso, que podría

FIGURA 3. *Espacio-tiempo distorsionado por la presencia de la masa.*

ser la imagen sencilla de una estrella, donde la gravedad domina sobre los efectos expansivos provenientes de su interior caliente, y también sobre efectos repulsivos de naturaleza cuántica de la materia a grandes presiones cuando se agota el combustible nuclear que alimenta a la estrella. A medida que el colapso progresa, el radio de la esfera se va haciendo cada vez más pequeño, hasta que la superficie de la esfera alcanza la dimensión del horizonte de eventos. Si no hay fuerza alguna que detenga el colapso, como ocurre con estrellas moribundas muy masivas, el radio termina siendo literalmente un punto con la masa confinada a un volumen nulo. Esta masa reducida a lo que se denomina una *singularidad*, de acuerdo con las ecuaciones de campo de la Relatividad General, deforma la estructura causal como se muestra en la figura 4, doblando los conos causales hacia el interior de la zona de no retorno.

Tal estructura causal es lo que caracteriza a un agujero negro: en la figura 4 se observan dos regiones delimitadas por la línea roja vertical, que representa el radio del horizonte de eventos en un diagrama espacio-temporal (el radio que determina la región de no retorno visto a lo largo del tiempo), donde la región de la derecha es el espacio-tiempo exterior y la región de la izquierda el interior del agujero negro. La línea vertical azul del extremo izquierdo representa el transcurrir del tiempo, pero también representa la posición de la singularidad vista a lo largo del tiempo. La línea azul horizontal describe el espacio físico identificado con el recorrido de uno de los radios de la esfera en el proceso de colapso. Como la esfera es simétrica, el espacio asociado a uno de los radios permite

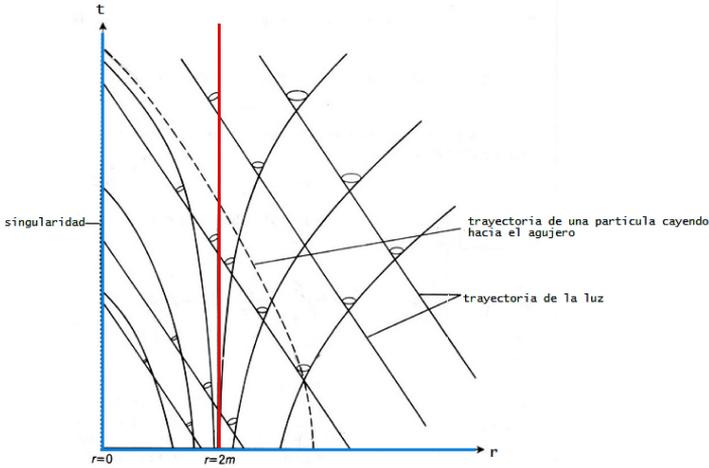


FIGURA 4. Estructura causal del espacio-tiempo en presencia de una masa esférica colapso. Adaptada de [4]

observar el espacio tridimensional en una dimensión, lo que quiere decir que la figura 4 es una muy buena representación de un agujero negro en el espacio-tiempo. Las líneas negras que forman la rejilla de conos sobre las regiones mencionadas, conforman la estructura causal. Estos conos causales al interior del agujero negro muestran claramente por qué de esa región no puede salir absolutamente nada, incluida la luz. Basta escoger un punto allí y observar el cono causal asociado, inclinado hacia la singularidad, donde un rayo de luz emitido desde tal punto sólo se podría desplazar por los bordes del cono, en dirección de la singularidad, y si se emite materia con masa, las posibles trayectorias de éstos están dentro del cono, nuevamente en dirección de la singularidad. Moverse por fuera del cono, única posibilidad de salir del agujero negro, es imposible porque significaría viajar a mayores velocidades que la luz.

En la estructura causal del espacio-tiempo de un agujero negro se manifiesta un insólito comportamiento del tiempo en las vecindades de los horizontes de eventos que, conjugado con los efectos cuánticos, ha llevado a la física actual a un callejón sin salida. Observando la estructura causal, un observador A, aprecia un observador B que cae a un agujero negro desde una gran distancia. Como lo vería el observador A, que ha decidido permanecer fijo

a una distancia segura, el observador B parece detenerse antes de cruzar el horizonte de eventos. Es decir, mientras el observador B en caída hacia un agujero negro, de acuerdo a su tiempo, en un momento dado cruza el horizonte y continúa su viaje a la singularidad, el observador A, que es externo y decide permanecer en reposo observando la hazaña del observador B, registra con sorpresa que el tiempo de este se congela y nunca cruza el horizonte de eventos. Ello se debe a que los bordes de los conos causales distorsionados, que son los caminos de la luz, muy cerca del horizonte de eventos, se inclinan casi perpendicularmente a la recta espacial; entonces las señales que envíe el observador en caída para ser registradas por el observador fijo, viajarán hacia arriba del gráfico, sin posibilidad de alcanzar al observador externo cuando finalmente el primer observador llegue al horizonte de eventos según su propia observación.

## 2. La magia cuántica desaparece a los agujeros negros

Los efectos cuánticos aparentemente violan prohibiciones de la Relatividad General en las regiones cercanas a los horizontes de eventos de los agujeros negros. Una de esas “violaciones” permitiría la evaporación de los agujeros negros, lo cual facilitaría la fuga de la materia y radiación del interior de estos. Las incertidumbres del mundo cuántico se acrecientan con la presencia de los agujeros negros. A la sentencia de Einstein “*Dios no juega a los dados con el universo*”, Stephen Hawking replicó “*Dios no solo juega a los dados con el universo sino que los envía donde no se pueden ver*” [1].

El vacío descrito en el mundo cuántico es la nada pletórica de universos de partículas, allí hay una desenfrenada creación y destrucción de partículas con sus antipartículas, conservando nula la energía promedio del vacío, como debe ser por la ley de conservación de la masa y energía, tal como se muestra en la figura 5, donde se asume que el espacio está lleno de pares de partículas y antipartículas virtuales que se materializan constantemente en parejas alejándose y acercándose para aniquilarse de nuevo entre ellas.

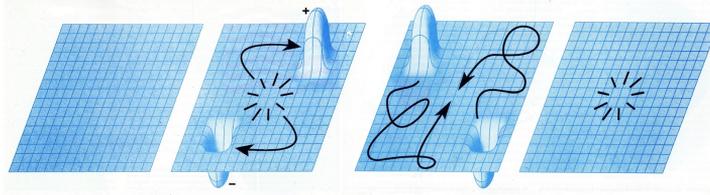


FIGURA 5. *Energía del vacío. Tomada de [5]*

El distintivo de partículas virtuales a diferencia de las reales, se basa en el hecho que estas no pueden observarse directamente. Sin embargo, pueden medirse sus efectos indirectos, y su existencia se ha confirmado por un pequeño corrimiento que se observa en el espectro emitido por los átomos de hidrógeno excitados, denominado el efecto Lamb. Sin embargo, en las inmediaciones externas a los agujeros negros, la autodestrucción efectiva se reduce, como lo caricaturiza la figura 6, cuando las antipartículas (representadas en color rojo) viajan hacia el interior y las partículas (en color verde) se alejan del agujero negro, evitando la autoaniquilación, constituyéndose en la colisión más probable, por efectos termodinámicos.

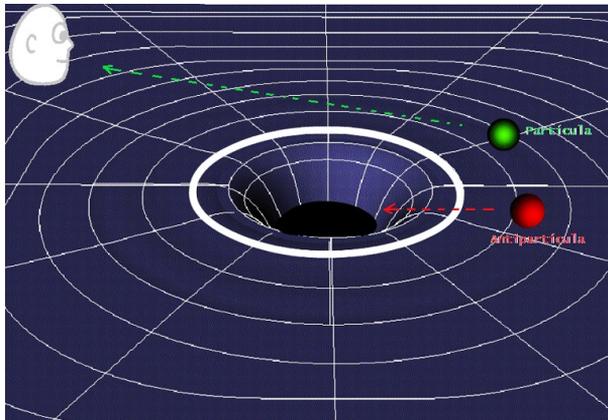


FIGURA 6. *Radiación Hawking.*

Un observador externo, quien sólo detecta las partículas y mide la masa total del agujero negro, percibe una evaporación del objeto colapsado, puesto que cuanto más partículas detecta, menor es la masa residual del agujero negro, porque las partículas han

estado eliminando la materia colapsada al interior. A este fenómeno fantástico la ciencia lo denominó efecto Hawking.

### 3. Misterios y paradojas de los agujeros negros

En 1998 John Archibald Wheeler en conversaciones con el famoso físico teórico divulgador de la teoría de cuerdas Brian Greene, sostenía que el tema dominante de la física del futuro estaría relacionado con el concepto de información [6]. Wheeler afirmó que la materia y la radiación, de las cuales se asume que están constituidos todos los objetos del universo conocido hasta ahora, llevan consigo una entidad más fundamental, la información que de ellas se puede derivar. Así, el universo se puede considerar como un gran computador que procesa información de las cosas que suceden en un tiempo presente, un tiempo posterior y un tiempo futuro. Ejemplo de lo anterior es la información que se establece en el proceso de formación y evaporación de los agujeros negros.

Al formarse un agujero negro, según la Teoría General de la Relatividad, la información rica y compleja de la estrella que lo origina se reduce a tres magnitudes medibles por un observador externo: masa, carga y momentum angular. Toda la demás información, en principio, queda perdida para el mundo exterior.

La posibilidad de recuperar la información desintegrando los agujeros negros se convierte en una seria amenaza contra los pilares de la mecánica cuántica, cuando se considera desde la perspectiva del efecto Hawking. La naturaleza térmica de la evaporación de los agujeros negros no permitiría la existencia de correlaciones entre sus componentes que lleven información, atrapada al interior del horizonte de eventos, a los dominios de observadores externos.

La posibilidad real de que los agujeros negros roben información del universo para siempre, atentando contra el *principio de unitariedad* de la mecánica cuántica, ha planteado un reto muy grande a la física teórica. En la lucha por resolver la contradicción generada por la aparente pérdida de información en las fauces de los agujero negros, se recurrió al exótico *principio holográfico* que sostiene que toda la información del agujero negro se proyecta en el horizonte de eventos, evitando con ello la pérdida de tal información [6] [7].

Las explicaciones de Leonard Susskind, principal adversario de Hawking, en el marco de la teoría de cuerdas, junto con nuevos principios introducidos para resolver el problema de la pérdida de información en el seno de los agujeros negros ha conducido a nuevas paradojas [7]. Una de ellas plantea que al seguir el principio holográfico, la información podría ser codificada en el estado cuántico de la radiación en su conjunto si las partículas llegasen a tener estados entrelazados, de tal forma que las mediciones llevadas a cabo sobre una de ellas influiría inmediatamente en su pareja sin importar lo lejos que se encuentren. Sin embargo, en el año 2015 Polchinski y sus colaboradores se percataron de que si esto sucediese, se tendría que clonar información debido a que en su formulación seminal del principio holográfico plantea dos enredamientos: el de las partículas emitidas con las partículas que caen en el agujero, y la de las partículas emitidas con toda la radiación Hawking [8].

Para solucionar esta dificultad, se decide eliminar una de las posibles relaciones de enredamiento que plantea Susskind por la imagen holográfica. Al romper este enredamiento se libera una gran cantidad de energía, tal que el horizonte de eventos se convertiría en un anillo de fuego en el cual cualquier objeto que lo atravesase sería quemado. Es decir, nada entraría al interior del agujero negro y toda la información quedaría incinerada en su horizonte.

Todo observador en caída libre hacia un agujero negro debe encontrar una pared de fuego o *firewall* que lo destruye evitando que realice mediciones al interior de este. Además, la pared de fuego es inconsistente con la Teoría de Campos Cuánticos sobre Espacios-Tiempos Curvos. En el mundo de la geometría curva de la Relatividad General no existe un único tiempo para todos los observadores, lo que se traduce en el universo cuántico en la imposibilidad de tener un único referente de energía mínima para todos los observadores (no existe un único vacío para los campos de materia). Entonces, consistentemente con el principio de equivalencia en gravitación, el observador en caída a un agujero negro, descrito arriba, cuando pasa cerca al horizonte de eventos, no registra partículas ni estructura alguna, diferente a lo que registra el observador externo lejano, para quien ese sector del

espacio-tiempo se manifiesta con una gran energía y estructura térmica, en contradicción con la pared de fuego.

Todo ello es un indicador de la dificultad de trabajar conjuntamente con la Relatividad General y la Teoría de Campos Cuánticos. En particular, en la física de agujeros, el problema radica en que los efectos cuánticos en las vecindades de los agujeros negros demandan la existencia de estructuras térmicas y la Relatividad General únicamente exige suavidad geométrica. La comprensión de las paradojas de los agujeros negros cuánticos podrían ser la clave para descifrar el misterio de la gravedad cuántica.

## Referencias

- [1] S. W. Hawking, *Historia del Tiempo* (Editorial Crítica, 1989).
- [2] J. Arenas, *Astrónoma para todos. Retos modernos de una ciencia milenaria* (Benjamín Calvo, 2013).
- [3] J. Luminet, *Agujeros Negros* (Alianza Editorial, 1991).
- [4] R. Inverno, *Introducing Einstein's Relativity* (Clarendon Press, 1992).
- [5] L. Abbot, *El misterio de la constante cosmológica* (Investigación y Ciencia, 1998).
- [6] B. Greene, *La Realidad Oculta* (Editorial Crítica, 2011).
- [7] L. Susskind, *La guerra de los agujeros negros* (Editorial Crítica, 2009).
- [8] J. Polchinski, *Agujeros negros y muros de fuego* (Investigación y Ciencia., 2015).