



Clasificación y radiación de un Agujeros Negro

Luis Fernando Horta Camacho ¹

11 de agosto de 2021

Resumen

En el presente trabajo se expone la clasificación de los agujeros negros, estos se pueden clasificar en tres grupos. El primero se conocen como agujeros negros de origen estelar, son resultado del colapso de una estrella, donde la masa del agujero supera las 3 masas solares. El segundo grupo son conocidos como agujeros negros supermasivos donde la masa es un billón o más grande que la del sol. Los terceros son teóricos y se conocen como micro agujeros negros. Adicional a esto se aborda la radiación que emite un agujero negro llamada radiación Hawking, junto con la definición de entropía, y la explicación de cada uno de los términos que la componen.

1. Introducción

Un agujero negro es un objeto astrofísico, que para que una masa escape de su efecto gravitacional deberá superar la velocidad de la luz, en base a esto ni siquiera la luz podría escapar de este objeto por lo que se ve como un objeto negro.

La superficie que rodea el agujero, donde nada puede escapar debido al gran efecto gravitacional, se conoce como el horizonte de sucesos (event horizon). En un caso sencillo donde el agujero negro no tiene movimiento de rotación, el tamaño de este horizonte de sucesos se comporta como una esfera cuyo radio se conoce como el radio de Schwarzschild y esta dado por: [6]

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Donde G es la constante de Cavendish $G \approx 6,674 \times 10^{-11} Nm^2/Kg^2$; M es la masa del agujero y c es la velocidad de la luz $c \approx 299792458 m/s$.

Lo que hay dentro de un horizonte de sucesos es desconocido pero las teorías de Einstein dicen que el centro de un agujero negro no rotativo es una singularidad, un punto cuyo volumen es cero y de densidad infinita, un punto donde el espacio-tiempo es curvado; pero en general se tiene que las teorías actuales de la física no pueden explicar con detalle lo que hay en el centro de un agujero negro.

Para un agujero rotando se tiene una superficie conocida como límite estático (static limit), objetos que caen en esta zona no pueden mantenerse en un estado estacionario por alguna fuerza, pero deben estar orbitando el agujero. De la zona comprendida entre el límite estático y el horizonte de sucesos llamada **ergosphere** (ver

figura 1) se puede escapar ya que el efecto gravitatorio aún no es máximo.[7]

Un bosquejo de las principales partes de un agujero negro puede ser

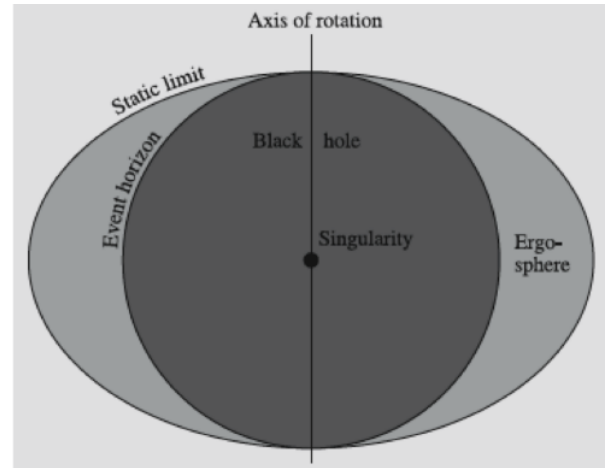


Figura 1: Un agujero negro está rodeado por un horizonte de eventos esférico. Además de esto, un agujero negro giratorio está rodeado por una superficie plana en cuyo interior ninguna materia puede permanecer estacionaria. Esta región se llama ergosfera.[7]

Un observador cayendo en un agujero negro percibe el tiempo normalmente en su paso por el horizonte de sucesos, sin embargo un observador lejano ve que la velocidad de ese observador cayendo al agujero disminuye tendiendo a cero mientras se va acercando al horizonte de sucesos.

La fuerza gravitacional apunta hacia el centro del agujero y de-

¹lfhortac@unal.edu.co

pende de la distancia, sin embargo un cuerpo cayendo siente esta fuerza en diferentes direcciones y magnitudes.

Las fuerzas de marea son más notorias cerca del agujero negro, por lo tanto el cuerpo será destruido al caer en el agujero, lo que sucede con la materia es desconocido para la física actual.

Un agujero negro posee tres propiedades observable, las cuales son la masa, el momento angular y la carga eléctrica.[7]

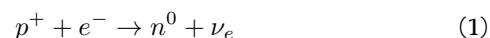
Los agujeros negros emiten radiación por lo tanto no son completamente negros, se tiene entonces que el agujero va perdiendo masa a medida que aumenta su radiación hasta que se evapora por completo.

2. Formación

Los agujeros negros se forman en un proceso de colapso gravitatorio que fue ampliamente estudiado a mediados de siglo XX por diversos científicos, particularmente Robert Oppenheimer, Roger Penrose y Stephen Hawking, entre otros. Hawking, en su libro divulgativo Historia del tiempo: del Big Bang a los agujeros negros (1988), repasa algunos de los hechos bien establecidos sobre la formación de agujeros negros.

Este proceso comienza después de la "muerte" de una gigante roja (estrella de 10 a 25 o más veces la masa del Sol), entendiéndose por "muerte" la extinción total de su energía. Tras varios miles de millones de años de vida, la fuerza gravitatoria de dicha estrella comienza a ejercer fuerza sobre sí misma originando una masa concentrada en un pequeño volumen, convirtiéndose en una enana blanca. En este punto, dicho proceso puede proseguir hasta el colapso de dicho astro por la autoatracción gravitatoria que termina por convertir a esta enana blanca en un agujero negro. Este proceso acaba por reunir una fuerza de atracción tan fuerte que atrapa hasta la luz en este.

En palabras más simples, un agujero negro es el resultado final de la acción de la gravedad extrema llevada hasta el límite posible. La misma gravedad que mantiene a la estrella estable, la empieza a comprimir hasta el punto que los átomos comienzan a aplastarse. Los electrones en órbita se acercan cada vez más al núcleo atómico y acaban fusionándose con los protones, formando más neutrones mediante el proceso:



Este proceso comportaría la emisión de un número elevado de neutrinos. El resultado final es una estrella de neutrones. En este punto, dependiendo de la masa de la estrella, el plasma de neutrones dispara una reacción en cadena irreversible, la gravedad aumenta enormemente al disminuirse la distancia que había originalmente entre los átomos. Las partículas de neutrones implosionan, aplastándose más, logrando como resultado un agujero negro, que es una región del espacio-tiempo limitada por el llamado horizonte de sucesos. Los detalles de qué sucede con la materia que cae más allá de este horizonte dentro de un agujero negro no se conocen porque para escalas pequeñas sólo una teoría cuántica de la gravedad podría explicarlos adecuadamente, pero no existe una formulación completamente consistente con dicha teoría.

3. Clasificación

3.1. Agujeros negros de origen estelar

Este tipo de agujero negro se forma cuando una gran estrella colapsa y gran parte de su masa se concentra en un objeto compacto con una gravedad muy grande que como se menciono anteriormente, ni la luz puede escapar de su efecto gravitacional.[8]

Una estrella de varias veces la masa del sol, es muy posible que se convierta en un agujero negro al momento de su colapso. El núcleo se contrae formándose un objeto muy denso, donde debido a su gran masa el colapso es tan rápido que la materia se reduce al infinito y se forma un objeto cuyo tamaño puede compararse con la cabeza de un alfiler (singularidad).

Existen diferentes métodos para detectar agujeros negros de origen estelar, uno de estos es llamado "gravitational microlensing", este método se basa en que existen sistemas binarios donde una de sus componentes es un agujero negro, entonces por la gran atracción gravitacional materia de la estrella compañera es "halada" por el agujero y se forma un disco gas que envuelve el agujero negro, este disco provoca un aumento en la temperatura del agujero lo que hace que emita radiación en rayos X primordialmente.

3.2. Agujeros negros súper masivos

Mediante ondas de radio se ha descubierto un objeto compacto en el centro de la vía láctea llamada Sagitario en la constelación que lleva su mismo nombre, debido a los efectos que produce en las orbitas cercanas se puede concluir en este caso que existe un objeto muy compacto con un gran efecto gravitacional.

Se cree que todas las galaxias albergan un agujero negro súper masivo en su centro.

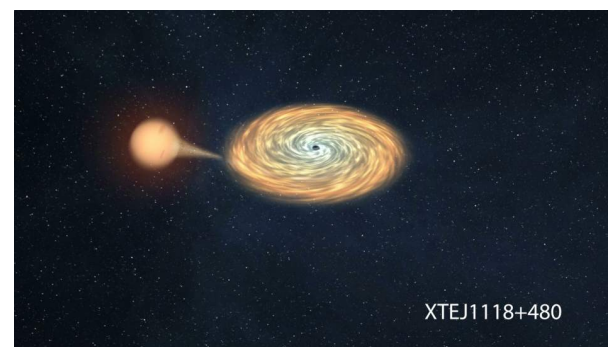


Figura 2: Imagen artística de un sistema binario agujero negro-estrella.

Algunas propiedades de los agujeros negros súper masivos son:

- La densidad de un agujero negro súper masivo puede ser muy baja, incluso menor que la densidad del agua. Esto ocurre porque el radio del agujero negro aumenta linealmente con la masa, por lo que la densidad decae con el cuadrado de la masa.
- Las fuerzas de marea cerca del horizonte de sucesos son de menor intensidad. Esto se debe a que la singularidad esta

muy alejada del horizonte, si un observador viajará al centro de un agujero negro, no experimentaría fuerzas de marea importantes hasta estar muy cerca de la singularidad.[2]

3.3. Micro Agujeros negros

Es un objeto hasta la fecha únicamente teórico, son más pequeños que los de origen estelar y se cree son producto del Big Bang. Debido a su pequeño tamaño viven poco tiempo ya que como se menciono antes, los agujeros emiten radiación y se va disminuyendo el radio hasta que se evaporan por completo, con base en que se originaron como consecuencia de las altas temperaturas del Big Bang y en que son agujeros de corta vida es que se cree que en la actualidad no existen micro agujeros negros. [2]

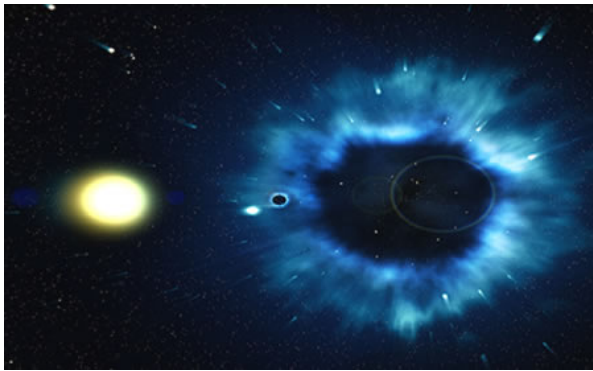


Figura 3: Imagen ficticia de un micro agujero negro.[1]

Los astrónomos han sospechado durante mucho tiempo que el lugar más probable para encontrar un agujero negro mediano de masa sería el núcleo de un objeto similar a la galaxia en miniatura llamado un cúmulo globular. Sin embargo, nadie ha sido capaz de encontrar tal objeto.[5]

4. Radiación de un Agujero negro

Una de las consecuencias del principio de indeterminación de Heisenberg son las fluctuaciones cuánticas del vacío. Estas consisten en la creación, durante brevísimos instantes, de pares partícula-antipartícula a partir del vacío. Estas partículas son "virtuales", pero la intensa gravedad del agujero negro las transforma en reales. Tales pares se desintegran rápidamente entre sí, devolviendo la energía prestada para su formación. Sin embargo, en el límite del horizonte de sucesos de un agujero negro, la probabilidad de que un miembro del par se forme desde el interior y el otro en el exterior no es nula, por lo que uno de los componentes del par podría escapar del agujero negro; si la partícula logra escapar, la energía procederá del agujero negro. Es decir, el agujero negro deberá perder energía para compensar la creación de las dos partículas que separó. Este fenómeno tiene como consecuencias la emisión neta de radiación por parte del agujero negro y la disminución de masa de este.[3]

Cuando un protón, u otro barión, cae en un agujero negro, debe neutralizar su número bariónico en energía como los gravitones. Dentro del modelo estándar, esto se lleva a cabo absorbiendo un antiprotón de un par virtual cercano al horizonte, lo que da un

crecimiento mínimo de la masa del agujero. El protón dentro del horizonte del agujero puede descomponerse primero en partículas más ligeras, y posteriormente el número de leptones del positrón es neutralizado por un electrón de un par virtual que conduce a un crecimiento más rápido de la masa del agujero. La amplitud de la neutralización es aproximadamente proporcional a A y de manera similar para los bariones. La intensidad de la radiación saliente depende claramente del flujo de partículas que caen en el agujero negro. Cuando un agujero es bombardeado por bariones o leptones, se predice que la radiación del agujero tiene un componente Hawking térmico y bariónico / leptónico que consiste predominantemente en los leptones más ligeros. Mientras que un BH se enfría al aumentar la masa, se espera que la cantidad relativa del componente bariónico / leptónico estimulado aumente con la masa del agujero.

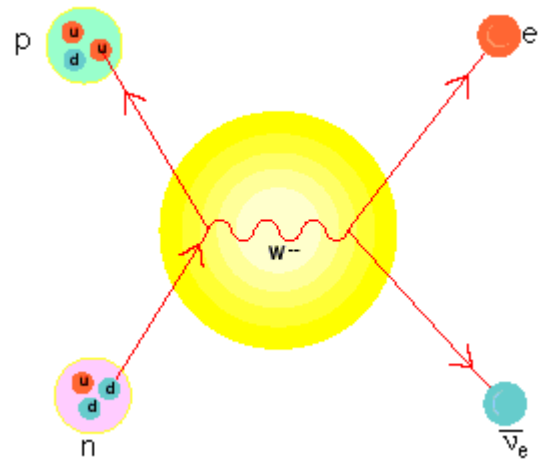


Figura 4: Interacción de partículas en el instante que caen al agujero negro

Según esta teoría, un agujero negro va perdiendo masa, a un ritmo inversamente proporcional a esta, debido a un efecto cuántico. Es decir, un agujero negro poco masivo desaparecerá más rápidamente que uno más masivo. Concretamente, un agujero negro de dimensiones subatómicas desaparecería casi instantáneamente.

Cabe mencionar que la disminución de masa de un agujero negro por radiación de Hawking sería únicamente perceptible en escalas de tiempo comparables a la edad del universo y tan solo en agujeros negros de tamaño microscópico remanentes quizás de la época inmediatamente posterior al Big Bang. Si esto es así, hoy podríamos ver explosiones de agujeros negros muy pequeños, algo de lo que no se tiene evidencia alguna.

La radiación de Hawking está ampliamente admitida por la física actual, si bien es casi imposible llegar a medirla y por tanto verificarla: paradójicamente, la expulsan en mayor cantidad los agujeros negros más pequeños e indetectables, mientras que los grandes, aquellos que los astrofísicos pueden estudiar directamente, producen tan poca que es indistinguible. Pero, al menos, en el laboratorio se ha logrado recrear un fenómeno parecido: investigadores del Instituto de Tecnología de Israel Technion han generado análogos de minúsculos agujeros negros que funcionan con el sonido en lugar de la luz y en los que han conseguido demostrar algo similar a la radiación de Hawking. Estos experimentos han confirmado dos predicciones del físico: que la radiación es espontánea se ge-

nera a partir del espacio vacío y que es estacionaria no cambia de intensidad con el tiempo[4].

El universo está descrito por la relatividad general clásica a grandes distancias y por la gran teoría del campo cuántico unificado de partículas a escalas microscópicas. El gravón es un estado de conexión crítico entre los agujeros negros microscópicos y los campos cuánticos. Como se ve desde el lado del campo cuántico, es el equivalente al colapso del vector de estado cuántico en la teoría clásica. Visto desde el lado clásico, el agujero negro pierde su horizonte y hace una transición a campos cuánticos. El horizonte requiere un tratamiento matemático adecuado, pero la imagen física que se da aquí debe ser clara. La desintegración de un microagujero negro puede aproximarse mediante una desintegración escalar similar a Higgs. Ahora bien si analizamos la entropía de un agujero negro:

$$S = \frac{1}{4} \frac{c^3 k}{G \hbar} A \quad (2)$$

La fórmula de Bekenstein-Hawking para la entropía de un agujero negro

La entropía se puede entender como la cantidad máxima de información dentro de un objeto o una medida del desorden dentro de un sistema macroscópico. Es decir, que la entropía de un agujero negro es igual al área de su superficie. Al desglosar la fórmula se pueden encontrar varias unidades termodinámicas, propiedades físicas de un agujero negro y constantes del universo tales como , \hbar la constante de Planck , G la constante universal de la gravedad, A al área del horizonte de eventos o punto de no retorno más allá del cual no se puede escapar de un agujero negro, c la velocidad de la luz, y k la contante de Boltzman.

Según Stephen Hawking, en los agujeros negros se fusionan el segundo principio de la termodinámica, lo que dio pie a especulaciones sobre viajes en el espacio-tiempo y agujeros de gusano. El tema está siendo motivo de revisión; Hawking se retractó de su teoría inicial y admitió que la entropía de la materia se conserva en el interior de un agujero negro. Según Hawking, a pesar de la imposibilidad física de escape de un agujero negro, estos pueden terminar evaporándose por la radiación de Hawking. La cual esta dado por:

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k} \quad (3)$$

- \hbar , es la constante reducida de Planck.
- c es la velocidad de la luz.
- k es la constante de Boltzmann.
- G la constante gravitacional.
- M es la masa de un agujero negro.
- a es la aceleración del observador de Rindler.

Aplicando las ecuaciones anteriores al caso solar, si este se llegara a convertir en un agujero negro, tendría una temperatura de radiación de tan sólo 60 nK (nanokelvin). Esta temperatura de radiación es notablemente inferior a la temperatura debida a la radiación de fondo de microondas, que es superior a los 2.7 K , por lo que si existe la radiación de Hawking, ésta podría ser indetectable.

[3]

Referencias

- [1] <http://www.lavanguardia.com/ciencia/fisica-espacio/20160129/3017547631-saber-agujeros-negros.html>.
- [2] <https://cmcarminacmartin.jimdo.com/clasificaci%C3%B3n-de-los-agujeros-negros/micro-agujeros-negros/>.
- [3] https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_de_Hawking.
- [4] <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/fisica/stephen-hawking-y-la-historia-de-los-agujeros-negros/>.
- [5] <https://www.nasa.gov/>.
- [6] Morison I. *Introduction to Astronomy and Cosmology*. Vol. 1. Reino Unido: John Wiley & Sons., 2008.
- [7] Hannu Karttunen; Pekka Kroger; Heikki Oja ;Markku Poutanen; Karl J.Donner. *Fundamental Astronomy*. fifth. Vol. 1. Springer, dic. de 2006.
- [8] Olds M. *Astronomica*. Vol. 1. Australia: Millennium House Pty Ltd.