

Como “ver” un agujero negro

Leonel Montiel Granados¹

Juan Jose Contreras Gonzalez²

Katia Natali Nuñez Guía³

Universidad de Guanajuato, División de Ciencias e Ingenierías

l.montielgranados@ugto.mx¹

jj.contrerasgonzalez@ugto.mx²

kn.nunezguia@ugto.mx³

Resumen

En este proyecto se ha estudiado el comportamiento de algunas propiedades de una partícula justo antes de cruzar el límite de un agujero negro de Schwarzschild.

Explicando la historia de donde surgió la palabra “agujero negro”, que significa la métrica de Schwarzschild y por qué es tan importante para este estudio.

Han sido estudiados tres aspectos como lo son:

- El potencial: Cómo cambia la energía de una partícula a medida que se acerca el agujero negro.
- La temperatura: Cómo se comporta la misma en las cercanías del agujero negro.
- La luminosidad: Cómo brilla una partícula justo antes de cruzar el radio de Schwarzschild.

Palabras clave: disco de acreción; agujero negro; potencia; luminosidad; temperatura.

Introducción

¿Te has preguntado alguna vez que sucede cuando te acercas a un agujero negro?

La existencia de cuerpos tan densos de los cuales ni la luz puede escapar fue teorizada por primera vez en 1786 por J. Michell mediante una carta que le escribe a H. Cavendish donde le propone la existencia de “cuerpos oscuros” que tienen esta propiedad. Debido a la dificultad que se tenía en esa época esta propuesta queda en el olvido.

Es hasta 1915 cuando Albert Einstein publica su teoría de la relatividad y mediante la primera solución que se obtiene a sus ecuaciones de campo que la idea de los “cuerpos oscuros” resurge. Esta solución fue determinada en 1916 por Karl Schwarzschild en la que él buscaba describir el campo gravitacional externo de un cuerpo masivo con simetría esférica y que desde ahora nos vamos a referir a ella como solución (métrica o agujero negro) de Schwarzschild. El mismo Schwarzschild observó que su solución tenía algunos problemas, ya que al considerar radios de $r=0$ o $r=2M$ el campo gravitacional diverge, es decir, se vuelve infinito, y además en $r=2M$ la coordenada temporal se vuelve cero.

El problema de la divergencia en $r=2M$ lo logró resolver D. Finkelstein en 1958, mostrando que esta se debe por la elección de coordenada que hizo Schwarzschild para resolver las ecuaciones de Einstein y que en un nuevo sistema de coordenadas la singularidad desaparece, pero mantenía la característica de que la coordenada temporal se vuelve cero. Esto le indicó que este radio representa el límite del cuerpo esférico que estaba estudiando y que ahora conocemos como horizonte de eventos y en el caso particular del agujero negro de Schwarzschild le llamamos *radio de Schwarzschild*. Desafortunadamente la otra singularidad, la de $r=0$, se mantiene en cualquier sistema coordenado y debemos aprender a vivir con ella, aunque esta siempre apareciera cubierta por el horizonte de eventos así nunca tendremos contacto con ella por lo tanto estamos a salvo.



La existencia en la naturaleza de los agujeros negros siempre fue cuestionada por su dificultad para poder observarlos de manera directa a pesar de que ya existían varias evidencias indirectas de ellos, particularmente podemos mencionar los discos de acreción que se forman a su alrededor y que estudiaremos un poco más adelante este escrito.

Las dudas de que realmente hay agujeros negros en el universo (casi) desaparecieron apenas en 2015 gracias a la sorprendente medición de ondas gravitacionales provenientes de la colisión de dos agujeros negros realizada por la colaboración LIGO (siglas del inglés de *Observatorio de Ondas Gravitacionales con Interferómetro Láser*). Y finalmente en 2019 la colaboración del Telescopio de Horizonte de Eventos (EHT, por sus siglas en inglés), logró obtener una fascinante fotografía del agujero negro supermasivo que se encuentra en la galaxia en M87 y en 2022 nos volvieron a sorprender presentándonos la increíble fotografía del agujero negro supermasivo que se encuentra en el centro de nuestra galaxia al cual conocemos como Sagitario A*.

Como ya hemos mencionado los agujeros negros son objetos de los cuales ni siquiera la luz puede escapar, y por lo tanto no los podemos ver a simple vista, debemos pensar en maneras ingeniosas para poder detectarlos. Una de estas maneras puede ser observando que pasa con las partículas (planetas, cometas, estrellas pequeñas) que pasan cerca de él. Si una partícula empieza a ser atraída por el mismo agujero negro, ésta empezará a orbitarlo, pero si su trayectoria se desvía un poco ésta podría entrar al interior del agujero negro. Las partículas que no llegan a entrar al agujero negro y se quedan en una órbita circular, que son aquellas que nos van a interesar estudiar, pueden formar estructuras interesantes como son los discos de acreción y que presentarán cambios en su temperatura y luminosidad que pueden ser medidos.

Precisamente son estos aspectos los que serán estudiados para el agujero negro de Schwarzschild, que como ya se mencionó solo nos interesa conocer su masa.



Figura 1. Primera imagen de agujero negro.

Objetivos

1. Entender que es un agujero negro de Schwarzschild y la métrica de Schwarzschild.
2. Hallar las ecuaciones de la geodésica dada la métrica de Schwarzschild
3. Predecir el comportamiento del potencial, temperatura y luminosidad de una partícula antes de cruzar el límite del agujero negro (radio de Schwarzschild).
4. Comprender como afectan el entorno de los agujeros negros.

Marco teórico

En esta sección, se explican conceptos y teorías fundamentales que serán de suma importancia para entender de manera más basta el estudio sobre agujeros negros. Conceptos tales como la relatividad general, la métrica de Schwarzschild, agujeros negros de Schwarzschild, y los fenómenos físicos relevantes como el potencial, la temperatura y la luminosidad de las partículas cerca del agujero negro de Schwarzschild.

Como punto principal de este estudio, Albert Einstein propuso y desarrolló la teoría de la relatividad general en 1915, donde describe la gravedad como una curvatura del espacio/tiempo causada por la masa y la energía. Esta teoría ha servido para hacer bastantes predicciones sorprendentes como lo son los agujeros negros.

¿Qué es un agujero negro?, es una región del espacio donde la gravedad es intensa, es decir, la curvatura del espacio/tiempo es inmensa, donde ni la luz puede escapar de su atracción. Este concepto desafía las leyes de la física y la cosmología. Otro punto interesante de los agujeros negros es la formación de estos, ya que se forman a partir del choque de estrellas masivas, pasando por 3 fases:

1. Estrellas masivas: Tienen 8 veces más la masa del Sol, y queman el combustible que poseen dentro.
2. Fase de supernova: Cuando se agota este combustible, la gravedad comprime la estrella produciendo un colapso catastrófico en el núcleo de la estrella, así mismo produce una explosión que expulsa las capas exteriores de la estrella.
3. Formación del núcleo compacto: Lo que queda después de la explosión es un núcleo extremadamente denso, y seguirá colapsando hasta formar un agujero negro.

Las propiedades que posee un agujero negro son las siguientes:

- Singularidad: En el centro del agujero negro se encuentra la singularidad, una región donde las leyes de la física dejan de ser aplicables.
- Horizonte de eventos: Es una superficie "circular" que rodea al agujero negro, donde es un punto de no retorno, es decir, cualquier objeto que cruce dicho horizonte el agujero negro lo va a atraer hacia él.
- Radio de Schwarzschild: Es la distancia que hay entre la singularidad y el horizonte de eventos.

En este artículo se estudiarán los efectos de un agujero negro en específico, el cual es el agujero negro de Schwarzschild, mismo que tiene propiedades únicas que servirán para el estudio.

Este tipo de agujero negro posee las mismas características anteriormente mencionadas, pero con la diferencia que éste no tiene carga eléctrica y ni momento angular (no tiene rotación), y su única propiedad elemental es su masa.

La métrica de Schwarzschild es una solución exacta de la relatividad general de Einstein para objetos esféricos sin carga eléctrica, describe como el espacio/tiempo se curva alrededor de un agujero negro. Esta métrica permite calcular las trayectorias de las partículas, y la luz cerca del agujero negro, es decir, en el horizonte de eventos.

Para darle seguimiento a este estudio, primero se tiene que saber qué es lo que se estudiará de la partícula en las proximidades del agujero negro de Schwarzschild.

En primer lugar, para entender como es el movimiento de las partículas cerca del agujero negro, se necesita conocer el concepto de potencial gravitatorio. Es la medida de energía que una partícula posee gracias a la gravedad de un objeto masivo, en este caso, un agujero negro. Siendo la combinación de dos efectos muy relevantes:

- **Gravedad:** La atracción gravitacional del agujero negro.
- **Fuerza Centrífuga:** Es la fuerza que se siente al momento de girar rápidamente.

Cuando la partícula está lo suficientemente cerca del agujero negro, el potencial gravitatorio se hace muy negativo, por lo que la atracción gravitacional del objeto masivo afecta al movimiento de partículas y luz.

Este concepto al igual que los otros es de suma relevancia porque ayuda a comprender varios aspectos del movimiento de una partícula cerca de un objeto masivo, por ejemplo:

- **Órbitas Estables:** Cuando el potencial es relativamente bajo, la partícula puede orbitar al agujero negro, como un planeta alrededor del Sol.
- **Órbitas Inestables:** Si la partícula se encuentra en un punto donde el valor del potencial es un máximo, entonces una pequeña perturbación haría que caiga al agujero negro o escape al espacio.

Como segundo concepto se tiene la temperatura asociada al disco de acreción de un agujero negro, ocasionada por el material de gas y polvo que está siendo atraído. La fricción, el movimiento y la compresión de las partículas en el disco de acreción giran a gran velocidad, y a medida que éstas se van moviendo y comprimiendo por la inmensa gravedad del agujero negro, chocan entre sí, generando calor.

Por último, la luminosidad, antes se ha mencionado que de un agujero negro no puede escapar nada ni la luz, pero existen maneras en las que un agujero negro se asocia con la luminosidad y radiación.

La luminosidad está definida como una medida de la cantidad de energía que una partícula emite en forma de luz y otras formas de radiación. Para los agujeros negros, está relacionada con los procesos que ocurren en su entorno cercano, una de las fuentes de luminosidad de un agujero negro es su disco de acreción, que son discos de gas y polvo girando alrededor del agujero negro. Entonces, a medida que la materia del disco es atraída al centro por la inmensa gravedad del agujero negro, ésta se va calentando de forma intensa a causa de la fricción y compresión. Dado que el material se calienta emite una gran cantidad de luz, lo que hace que los alrededores del agujero negro emitan un brillo.

Resultados:

La gráfica de la potencia determina la potencia de una partícula que orbita el disco de acreción (Fig. 2). Se puede entender, cómo la materia se comporta en función de la distancia al centro del agujero negro.

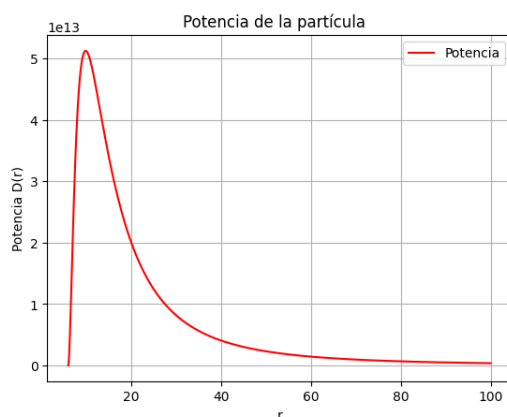


Figura 2. Gráfica de la potencia

En la Fig 3, se muestra cómo la temperatura del disco de acreción en función del radio. Se puede observar como la energía se disipa en forma de radiación térmica.

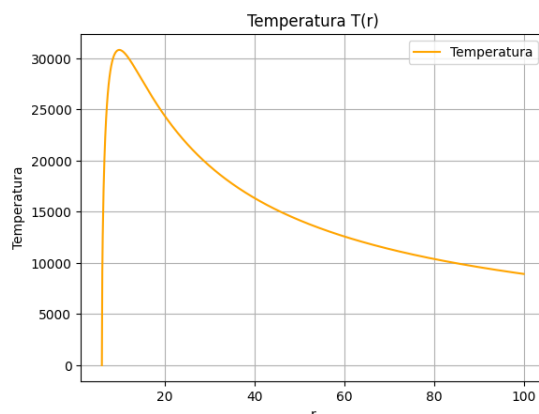


Figura 3. Gráfica de la temperatura

En la Fig. 4, la luminosidad en función de la frecuencia muestra como la cantidad de energía emitida en luz por el disco de acreción en diferentes frecuencias.

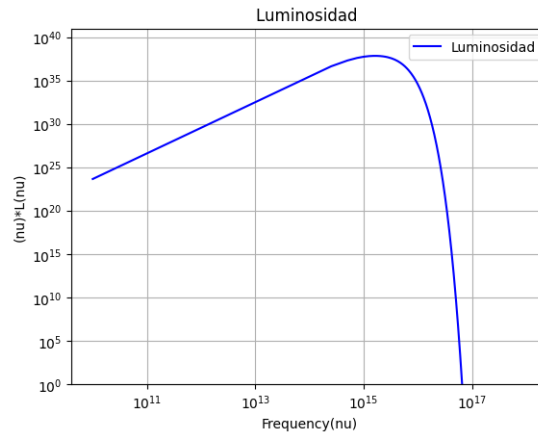


Figura 4. Gráfica de la luminosidad

Conclusión:

En este proyecto se han explorado algunos de los más fascinantes aspectos del universo, los agujeros negros. Se estudió desde cómo se forman hasta como pueden ser detectados, a pesar de su naturaleza invisible.

Se ha demostrado que, aunque sean objetos extremadamente oscuros y densos, se pueden detectar de manera indirecta, debido a la luz y radiación que emiten.

Se espera que este proyecto inspire a otras personas a seguir explorando las maravillas de la física y el cosmos. La investigación de los agujeros negros está en constante evolución, por lo que puede que un futuro se descubran más misterios del universo.

Bibliografía/Referencias

- Carroll, S. M. (2004). Spacetime and geometry: An introduction to general relativity. Addison-Wesley.
- Guzmán, F. S, Rueda-Becerril, J. M. (2009). Spherical boson stars as black hole mimickers. Physical Review.
- Hartle, J. B. GRAVITY An Introduction to Einstein's General Relativity.
- Megido, A. A. (2022). Agujeros Negros.
- Pérez, D, Pérez Bergliaffa, S. E, Romero, G. E. (2013). Accretion disks around black holes in modified strong gravity. Astronomy & Astrophysics.