VOLUMEN 28
Verano de la Ciencia XXIX
ISSN 2395-9797
www.jóvenesenlaciencia.ugto.mx

"Viendo" un agujero negro

C. Álvarez Arredondo[1], I.A. Perea Campos[2], A. Pinzón Arzola[3], A. Bernal Bautista[4] y G. Gutiérrez Cano[5]

[1]Estudiante de Licenciatura en Física. División de Ciencias e Ingenierías. Campus León. Universidad de Guanajuato
c.alvarezarredondo@ugto.mx[1]
[2]Estudiante de Licenciatura en Ingeniería Física. División de Ciencias e Ingenierías. Campus León. Universidad de Guanajuato
ia.pereacampos@ugto.mx[2]
[3]Estudiante de Licenciatura en Física. División de Ciencias e Ingenierías. Campus León. Universidad de Guanajuato
a.pinzonarzola@ugto.mx[3]
[4]División de Ciencias e Ingenierías. Campus León. Universidad de Guanajuato
bernal.a@ugto.mx[4]
[5]División de Ciencias e Ingenierías. Campus León. Universidad de Guanajuato
ggutierrezcano@ugto.mx[5]

Resumen

En este artículo se muestra la manera de caracterizar un agujero negro de Schwarzschild, mediante el análisis de las propiedades físicas del disco de acreción. Estas propiedades son: la temperatura, la potencia y la luminosidad. Dependiendo de los resultados de cada una de estas propiedades, se puede determinar si el disco de acreción que se está estudiando pertenece a un agujero negro. También se muestra una breve descripción del potencial efectivo de una partícula con el objetivo de entender ~~para la comprensión~~ el funcionamiento de un disco de acreción.

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

¿Qué es un agujero negro?

Un agujero negro es un objeto astronómico cuya fuerza gravitatoria es tan alta que ni siquiera la luz puede escapar de él e inevitablemente se mueve hacia él, donde toda la materia se acumula en un solo punto, generando una densidad de masa infinitamente grande, una singularidad.

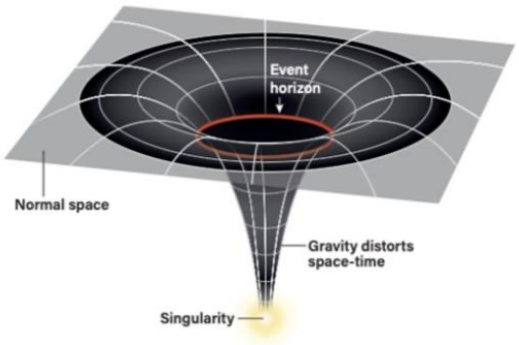

Imagen 1. Distorsión del tejido espacio-tiempo por la singularidad de un agujero negro. (Abi loeb mayo 18 2023, Astronomy)

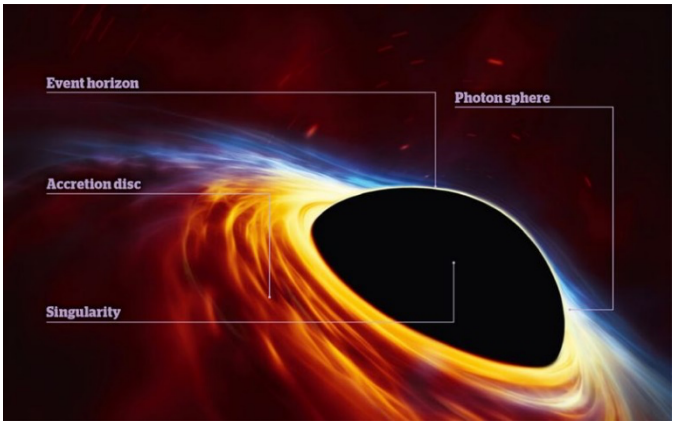

Imagen 2. Componentes, teóricos, de un agujero negro. (ESO, ESA/Hubble, M. Kornmesser/N. Bartmann)

La "superficie" del agujero negro recibe el nombre de horizonte de eventos, ésta se puede entender como la región limite en la cual ninguna partícula puede escapar del agujero puesto que la velocidad requerida para escapar de la atracción gravitatoria, en este punto, excede la velocidad de la luz.

Ver lo invisible

Entonces, si la luz no puede escapar de la atracción gravitatoria del agujero negro llegamos a la pregunta; ¿Cómo podemos estudiar aquello que no puede verse? Es interesante que en varios ámbitos de la ciencia moderna se llega a la misma pregunta sobre los fenómenos que estudia. La ciencia moderna ha desarrollado la metodología de la observación indirecta, que consiste en la recolección de datos sobre las características y propiedades del fenómeno en particular; es decir, se estudian los efectos de dicho fenómeno.

En el caso de los agujeros negros, una posibilidad para "observar" su existencia es estudiando los efectos de su fuerza gravitatoria sobre los objetos cercanos, como es la dinámica de una partícula de masa muy pequeña que orbita a su alrededor. Una vez estudiada la dinámica de una partícula, se introduce el modelo de *Disco de Acreción*. Este modelo consiste en considerar a millones de partículas de masa diminuta, como sería un gas, que orbitan al agujero negro, formando literalmente un disco alrededor del horizonte de eventos. Son las propiedades físicas de este disco las que podemos "ver" con mayor claridad.

Agujero negro de K. Schwarzschild:

El agujero negro de Schwarzschild es una solución esféricamente simétrica y estática a la ecuación de campo en el vacío de Einstein sin constante cosmológica, haciendo uso de la que ahora es referida como métrica de Schwarzschild.

$$g_{\mu\nu}dx^{\mu}dx^{\nu} = -\left(1-\frac{r_S}{r}\right)c^2\,dt^2 + \frac{dr^2}{\left(1-\frac{r_S}{r}\right)} + r^2\left(d\vartheta^2 + \sin^2\vartheta\,d\varphi^2\right).$$

La métrica describe el campo generado por una masa esférica simétrica, y depende del parámetro r_s. Para poder obtener la expresión para r_s se parte de la física clásica Newtoniana y del concepto de velocidad de escape, el cual hace referencia a la velocidad mínima requerida para que un objeto pueda escapar de la atracción gravitacional de un cuerpo astronómico, sin necesidad de propulsión adicional. Resolviendo la energía cinética del objeto, el radio de Schwarzschild

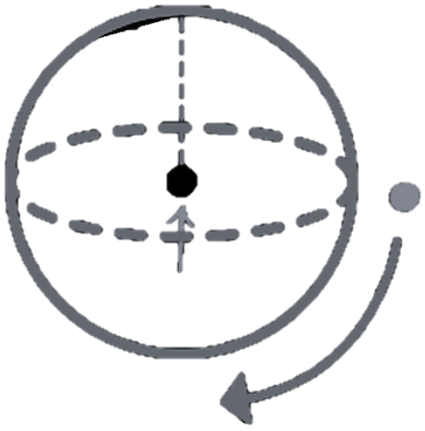

Imagen 3. Diagrama de una partícula, de masa diminuta, siguiendo una órbita geodésica temporal circular alrededor de un agujero negro esférico, estable y simétrico -Agujero negro de Schwarzschild-. Fuente: elaboración propia.

queda en términos de la Masa del agujero negro:

$$r_s = 2M$$

Potencial efectivo de una partícula:

El potencial efectivo de una partícula define la manera en la que ésta se mueve alrededor de un cuerpo. La forma de la órbita viene definida por el potencial efectivo, cuando la energía de la partícula tiene el valor mínimo, la órbita que describe es una órbita circular estable. En la imagen 4 se muestra una gráfica del potencial efectivo de una partícula que depende del radio.

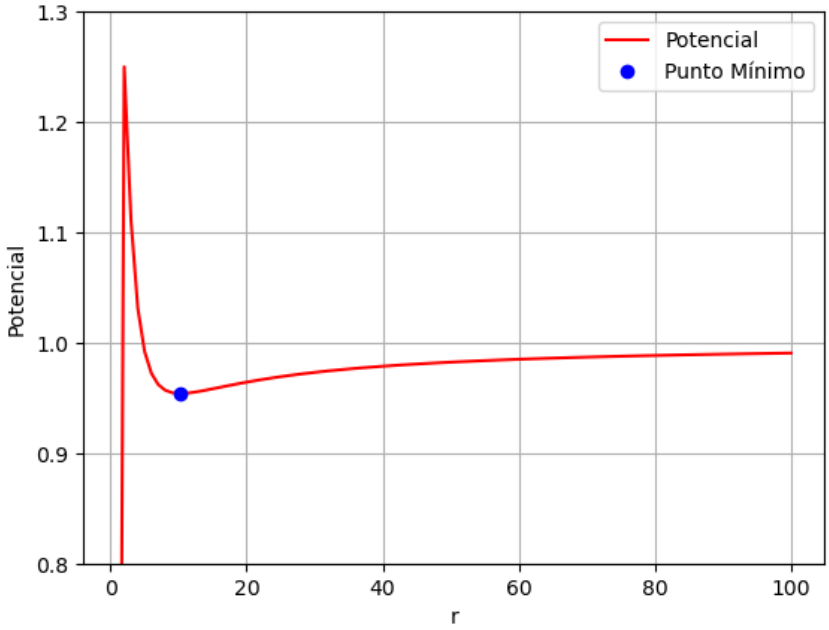

Imagen 4: Gráfica del potencial efectivo de una partícula. Fuente: elaboración propia.

En el caso de un agujero negro, dependiendo del lugar donde se encuentre el valor de la energía de la partícula, la órbita alrededor del agujero tomara distintas formas. Cuando la energía excede el punto máximo del potencial, se puede decir que la partícula "entra" al agujero negro. Para que se garantice una órbita circular estable, se debe cumplir la siguiente condición

$$r > 3r_s$$

donde r_s es el radio de Schwarzschild.[1].

Disco de acreción de un agujero negro

En un agujero negro, hay polvo y gas girando alrededor de él en lo que llamamos disco de acreción, este disco no se extiende todo el camino hacia el horizonte de eventos y esto es debido a que el disco gira en una órbita circular estable. Los discos de acreción presentan propiedades físicas que pueden ser medidas cuantitativamente y darnos una información general para determinar si el cuerpo sobre el que está girando el disco de acreción es un agujero negro o no. Para este caso se midieron tres propiedades del disco de acreción: la potencia, la temperatura y la uminosidad.

[1] El radio de Schwarzschild es un concepto matemático que define el radio del horizonte de eventos donde la velocidad de escape de una partícula es mayor a la velocidad de la luz

- **Potencia**

La potencia o el flujo de energía de un disco de acreción describe como es el momento y las velocidades angulares de las partículas que se encuentran orbitando en el disco de acreción. La imagen 5 muestra una gráfica de la potencia de un disco de acreción.

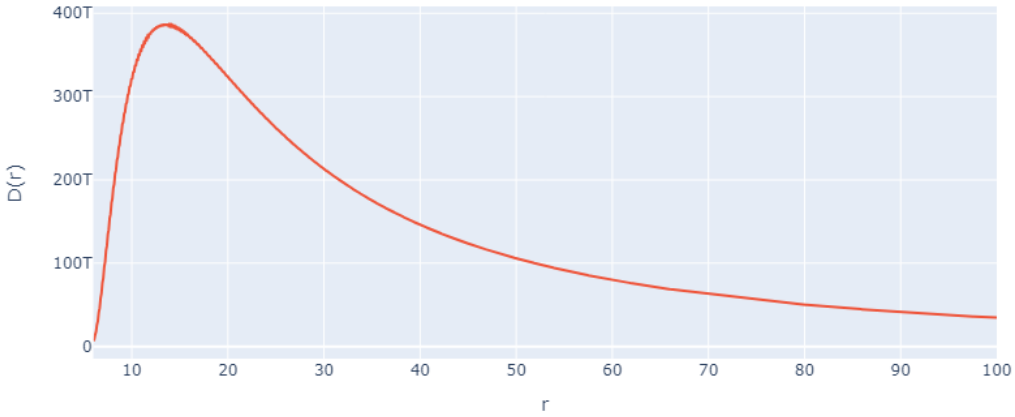

Imagen 5: gráfica de la potencia de un disco de acreción. Fuente: elaboración propia.

($\boldsymbol{D(r)}$) se define como la razón por unidad de área en la cual la energía cinética es disipada en calor por viscosidad o en trabajo por unidad de área generado por el disco de acreción. Para agujeros negros, el radio (r) se toma como $\boldsymbol{r = 6M}$ donde el término $\boldsymbol{M}$ es la masa del agujero negro. En la determinación de los datos en las gráficas, se tomó $\boldsymbol{M = 1}$.

- **Temperatura**

Para el caso de la temperatura, se dice que la materia que se encuentra en el disco de acreción está en equilibrio termodinámico. Esto implica que el modelo de radiación de cuerpo negro es ideal para describir la radiación emitida en la superficie del disco. El modelo de la radiación de cuerpo negro describe la relación entre la temperatura de un cuerpo y la longitud de onda de la radiación electromagnética que este emite. En la imagen 6 se muestra una gráfica de los datos de temperatura que se obtuvieron.

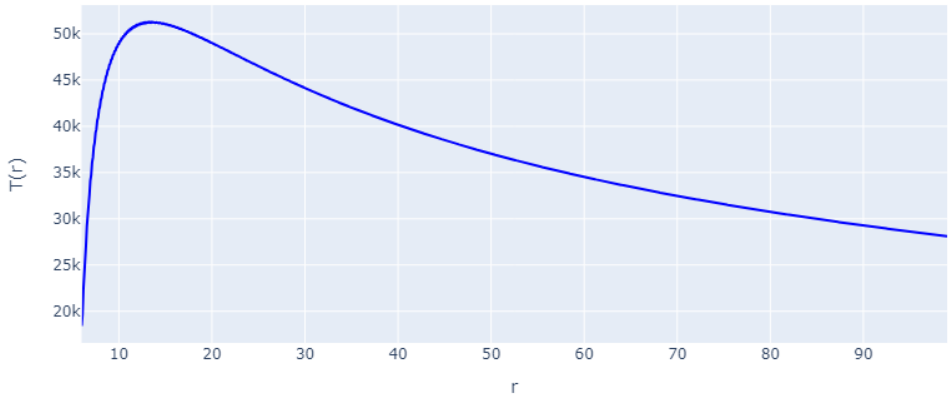

Imagen 6: Gráfica de temperatura del disco de acreción

- **Luminosidad**

La luminosidad, es la luz que emite el disco de acreción. Esta propiedad va de la mano con la temperatura del disco ya que se toma como base el modelo de radiación de cuerpo negro, del mismo modo se debe tomar en cuenta la frecuencia de los fotones y la inclinación del disco. A mayor inclinación, se cambia el espectro de potencia a luminosidades más altas y a menor inclinación a luminosidades más bajas. La imagen 7 muestra una gráfica de luminosidad que depende de la frecuencia emitida de los fotones.

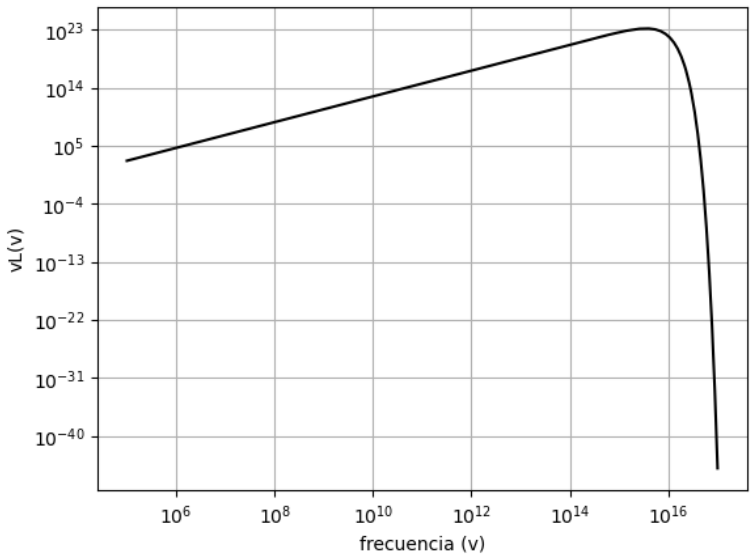

Imagen 7: Gráfica de la luminosidad del disco de acreción. Fuente: elaboración propia.

- ## Conclusión:

Dado los resultados del estudio de las propiedades físicas de un disco de acreción, podemos suponer que el disco pertenece a un agujero negro de Schwarzschild, de esta manera podemos mostrar que ya no es necesaria una observación directa de un fenómeno físico, sino que podemos simplemente estudiar las consecuencias de este, aplicar el modelo teórico conocido y caracterizar el fenómeno a estudiar.

- # Referencias

1. (S/f). Researchgate.net. Recuperado el 23 de julio de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/377834124_Thin_accretion_disk_signatures_in_hybrid_metric-Palatini_gravit
2. Guzmán, F. S. & Rueda-Becerril, J. M. (2009). Spherical boson stars as black hole mimickers. *Phys. Rev. D* 80, 084023.
3. Paiman, M., Cornean, H., & Köhn, C. (2023). Schwarzschild black holes in extended spacetime with two time dimensions. Astronomy, 2(4), 269–285. https://doi.org/10.3390/astronomy2040018
4. Schnittman, J. (2019, agosto 29). A brief history of black holes. Astronomy Magazine. https://www.astronomy.com/science/a-brief-history-of-black-holes/
5. (S/f-b). Ucr.edu. Recuperado el 23 de julio de 2024, de https://math.ucr.edu/home/baez/gr/ricci.weyl.html
6. Karl Schwarzschild - Important Scientists - the Physics of the Universe. (s/f). Physicsoftheuniverse.com. Recuperado el 23 de julio de 2024, de https://www.physicsoftheuniverse.com/scientists_schwarzschild.html
7. Black-body radiation. (s/f). Lco.Global. Recuperado el 23 de julio de 2024, de https://lco.global/spacebook/light/black-body-radiation/
8. Pérez, D., Romero, G. E., & Perez Bergliaffa, S. E. (2013). Accretion disks around black holes in modified strong gravity. Astronomy & Astrophysics, 551, A4. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220378