

Sombra del agujero negro de Schwarzschild

Emilia Flores Leal ¹

División de Salud e Ingeniería, Universidad de Guanajuato Campus Celaya-Salvatierra ¹
e.floresleal@ugto.mx

Mauricio Ángel Guerrero García ²

División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Guanajuato Campus León ²
mauricio.guerrero1405@gmail.com

Guadalupe Berenice Herrera González ³

División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Guanajuato ³
gb.herreragonzalez@ugto.mx

José Carlos Iñiguez Álvarez ⁴

División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato Campus Guanajuato ⁴
jose.iniguez@cimat.mx

Jaqueline Juárez Hidalgo ⁵

División de Salud e Ingeniería, Universidad de Guanajuato Campus Celaya-Salvatierra ⁵
j.juarezhidalgo@ugto.mx

Luis Gustavo Martínez Gutiérrez ⁶

División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Guanajuato ⁶
lg.martinezgutierrez@ugto.mx

Jael Eunice Pacheco Cordero

División de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Zacatecas ⁷
jaeleunice.pacheco@fisica.uaz.edu.mx

Grecia Teresa Ramírez Balderas

División de Salud e Ingeniería, Universidad de Guanajuato Campus Celaya-Salvatierra ⁸
gt.ramirezbalderas@ugto.mx

Resumen

En este trabajo utilizamos las ecuaciones de campo de Einstein para utilizar la solución de Schwarzschild y describir la dinámica de fotones en la misma. Esta solución es una solución de una masa esférica (i.e. estrellas, planetas, etc.); esto a su vez induce una métrica. Una vez inducida la métrica, se estudia la trayectoria que siguen los fotones en geodésicas a través de la misma métrica, puesto que la métrica es para objetos que son simétricamente esféricos esperamos que la curva que generen estas sea desde el punto de vista de dos dimensiones, círculos concéntricos.

Palabras clave: Agujeros negros, Relatividad General, Métrica de Schwarzschild

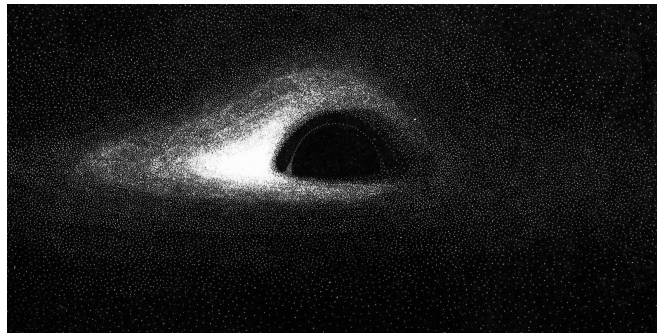


Figura 1. La primera simulación de un agujero negro por computadora (1979)

Agujero Negro

El término "agujero negro" fue introducido por el físico estadounidense J.A. Wheeler ya que habla de un cuerpo en el espacio el cual tiene un volumen capaz de absorber cualquier tipo de materia que se encuentre cerca de él y no tiene retorno, incluyendo la luz, por lo cual no puede ser observado. Esa es una descripción concisa de lo que es un agujero negro, pero tiene una definición un poco más complicada, esto incluyendo a las teorías que son capaces de describir estos cuerpos masivos, así como sus términos matemáticos y como con los avances de la ciencia podemos llegar a observar una parte de ellos conocida como la "sombra del agujero negro".

Introducción

Alrededor del siglo XVIII, John Michell y Pierre Laplace, teorizaron por primera vez un cuerpo celeste el cual tenía la característica de tener un tamaño masivo, el cual provocaba una velocidad de escape bastante intensa, pero tenía la característica de ir en dirección contraria, por lo tanto, se considera que este cuerpo celeste tenía una velocidad de absorción bastante intensa o una gran fuerza de gravedad. Con el paso de los años se fue estudiando más sobre esta área de la física para así poder describir tal cuerpo masivo. Sin embargo, existe un par de teorías que nos ayudan a entender lo que sucede con estos cuerpos masivos, o conocidos como "monstruos astronómicos" si lo apreciamos desde la "Teoría Gravitacional". Pero si analizamos el espacio-tiempo conlleva la presencia de estos cuerpos los podemos estudiar desde la "Teoría de la Relatividad General" de Einstein.

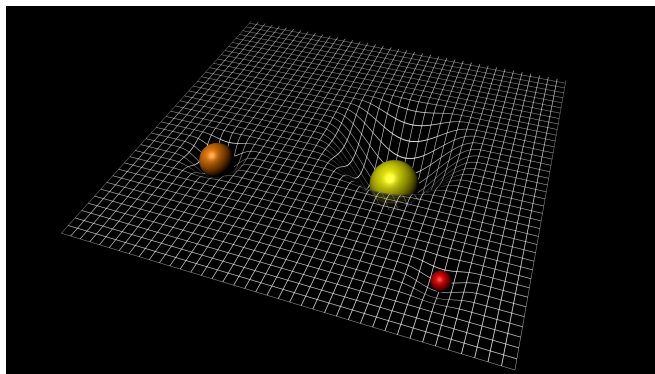


Figura 2. Un esquema de la relatividad como curvatura del espacio-tiempo

En ambas teorías mencionadas, los agujeros negros tienen un campo gravitacional muy fuerte esto se le adjudica a una gran masa. La fuerza de gravedad tan intensa se debe a una gran cantidad de masa que se localiza en el agujero negro, la fuerza de atracción gravitatoria según la teoría de Newton mientras más grande sea la masa M y más pequeño sea el radio r , la absorción será enorme.

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

Para entender un poco de la absorción que ocurre en el evento, analizamos la velocidad que se observa en tal evento. Esta velocidad se conoce como "Velocidad de escape".

$$V_e = \sqrt{\frac{2GM}{c^2}}$$

La velocidad suele tener una dependencia en la distancia del centro de gravedad de un objeto que se encuentra cerca del cuerpo celeste, observando la atracción del cuerpo celeste desde el radio hasta su centro de gravedad o podemos llamarlo origen, así definimos lo que llamamos "Horizonte de Eventos". Prácticamente el horizonte es la superficie donde las partículas nunca podrán salir agujero negro, cualquier cosa que se acerque o pasa por ahí será devorado por este.

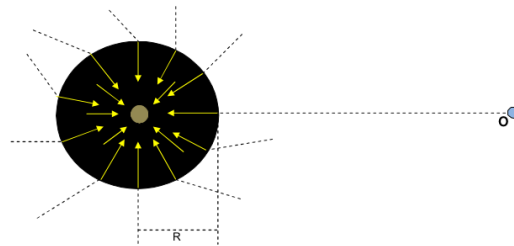


Figura 3. Tenemos un observador desde el punto O el cual se encuentra a una distancia lejana del horizonte de evento y no puede ser absorbido, el R es el radio del horizonte y pasando esta zona nada puede salir de ella.

Por otra parte, la teoría de Einstein cambia el enfoque de la gravedad por una alteración en el espacio-tiempo con respecto a la masa mayor del sistema; así el efecto de succión es tan grande para no poder salir de este incluyendo la luz. Entonces la teoría de la Relatividad General se convirtió en nuestra mejor herramienta para analizar este cuerpo masivo.

Métrica de Schwarzschild: una introducción a relatividad general de Einstein

Una de las nociones que son importantes a la hora de utilizar la relatividad es la noción de métrica. La métrica nos permite tener noción de distancias y junto con ella, la capacidad de medir en cualquier punto de referencia. En particular, existe una métrica que es importante en la teoría de la relatividad.

La métrica de Schwarzschild es una herramienta para poder analizar el Agujero Negro con una simetría esférica, dado que es la única solución a este fenómeno en un estado estático del sistema. Esta solución es exacta para las ecuaciones de Einstein en el vacío y al mismo tiempo la métrica proviene de las ecuaciones de campo de Einstein:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

En la ecuación anterior apreciamos tres términos de vital importancia: el primero $R_{\mu\nu}$, a este objeto lo conocemos como el tensor de Ricci, pero no es más que una manera de tener curvatura en un objeto geométrico (por ejemplo, una superficie). El segundo R , es el escalar de Ricci y nos habla de que tanto se curva nuestro objeto (en este caso es que tanto se curva nuestro espacio). Sin embargo, tenemos un término más: el tensor de energía momento, este tensor nos habla de la cantidad de materia en el espacio. Así podemos ver que la relatividad de Einstein nos implica que en presencia de materia el espacio se curva, esto nos dice que mientras más masa contenga un objeto, más se curva el espacio (nótese la figura 2). Es por eso que, para Einstein, la gravedad es equivalente a si cayéramos en dirección al objeto más pesado (en el caso del Sistema Solar, caemos en dirección al Sol), esto se conoce como el principio de equivalencia.

La métrica de Schwarzschild de la que hablamos antes tiene la siguiente forma,

$$ds^2 = \left(1 - \frac{R_s}{r}\right) dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{R_s}{r}} - r^2(d\theta^2 + \text{sen}^2\theta d\phi^2)$$

donde $R_s = 2M$ es conocido como el "Radio de Schwarzschild", que vendría siendo la medida del tamaño del agujero negro estático. El agujero negro bajo la métrica anterior, al no considerar la coordenada temporal, se puede ver como la esfera que muestra en la Figura 3.

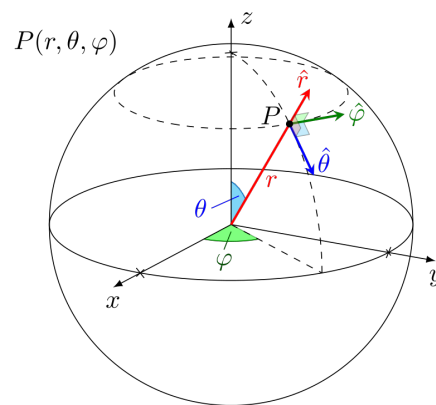


Figura 3. En tres dimensiones, una buena representación es una esfera

Al estudiar la métrica resulta que se presentan singularidades, cuando tenemos un radio r igual a cero e igual a $2M$. Al analizar la singularidad de $r = 2M$, podemos comprobar que al hacer un cambio de coordenadas esta desaparece por lo tanto podemos concluir que esta no es una singularidad real. Mientras que la singularidad en $r = 0$ se mantiene después del cambio de coordenadas, por lo tanto, es esencial.

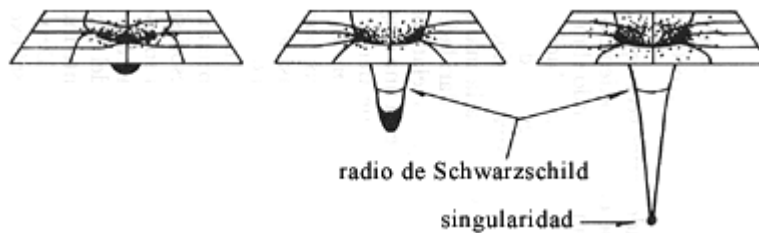


Figura 4. La singularidad esencial es el radio $r = 0$, junto con el radio de Schwarzschild

Desarrollo

Definición de geodésica

Ya que vimos que son los agujeros negros, una pregunta que se puede realizar de manera natural es: ¿Cómo es que podemos encontrar la sombra de este? La respuesta, está en utilizar un tipo de curvas especiales que se llaman geodésicas. Este tipo de curvas lo que nos describen es la curva de mínima distancia entre dos puntos en una superficie. De hecho, en nuestro día a día es un dicho común el decir que la línea más corta entre dos puntos es la línea recta y aunque esto es cierto en el plano, esto solo es un caso particular de muchos otros que ocurren en las matemáticas.

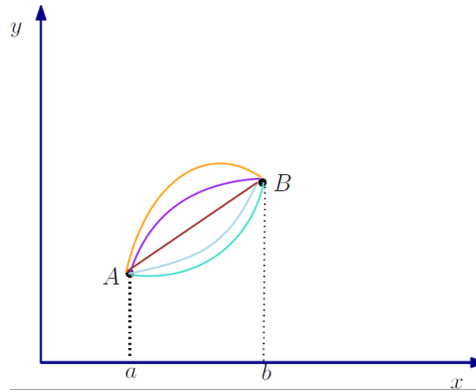


Figura 5: La línea recta como curva de mínima distancia entre dos puntos en el plano.

En el caso de la tierra (y así en general para cualquier superficie esférica) las geodésicas que se forman alrededor de una esfera esto es, en la superficie de la misma, están descritas por arcos de circunferencia.

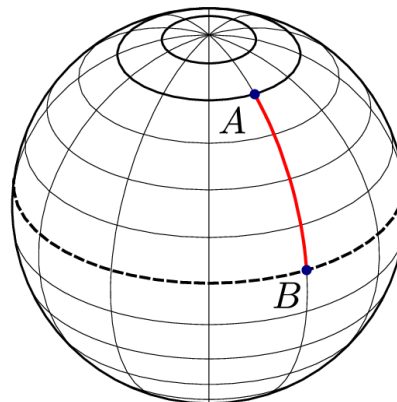


Figura 6. Geodésicas en una esfera

Entonces con todo esto en mente, ya que sabemos que son estas curvas especiales la siguiente pregunta es: ¿cómo es que las geodésicas juegan un papel a la hora del cálculo de un agujero negro? La siguiente sección es justo la respuesta a esa pregunta.

Relatividad y sombras de agujeros negros

Como vimos en secciones pasadas, la relatividad es la formulación de la física por excelencia para poder estudiar estos objetos. Lo impresionante de la misma es que la solución de Schwarzschild que vimos anteriormente sirve perfectamente para agujeros negros que tienen el mismo nombre (agujeros negros de Schwarzschild). Pero la relatividad no sólo nos permite entender de manera general los agujeros negros de manera inmediata también sirve para estudiar objetos que puedan orbitar alrededor de ellos.

Ahora bien, en la relatividad de Einstein podemos estudiar no solo objetos que tienen masa (e.g. tú, yo, un satélite y planetas) una cualidad sorprendente es que podemos encontrar las trayectorias que siguen objetos que no tienen masa. Uno de los hallazgos más importantes que tiene Einstein, es que podemos pensar a la luz como partículas que no tienen masa, a estas partículas las llamamos fotones.

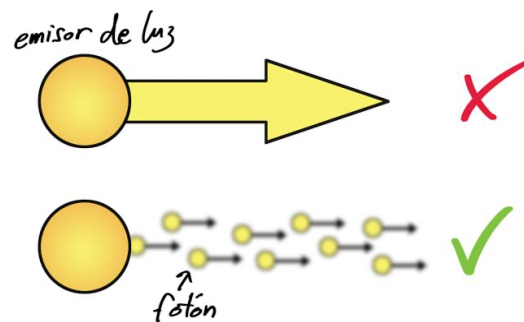


Figura 7. Un esquema del modelo de fotones

Un fotón, al ser la partícula de luz y al conocer la manera en que estos se desplazan, podemos investigar cuál va a ser la sombra que generan en diferentes objetos y un agujero negro no es la excepción a la regla. Ahora, las ecuaciones de relatividad no sólo nos permiten hablar de manera general sobre la forma, sino también de objetos que puedan orbitar alrededor de ellos. Pero se preguntarán, ¿cómo es que la relatividad nos permite hacer eso?, justo la métrica es la clave. La métrica, no solo es una manera de ver la forma geométrica de un objeto muy grande además tiene la cualidad de qué puede decirnos mucho sobre las curvas que se mueven en estos objetos o alrededor de ellos. En particular, nos permite hablar de objetos que siguen el menor camino posible, recordando lo que vimos al principio esto no es más que las geodésicas alrededor del mismo.

Pero, entonces, ¿cómo son las geodésicas de los fotones en una métrica de Schwarzschild y, por ende, las de un agujero negro del mismo tipo? Existen tres tipos: i) algunos fotones se moverán en geodésicas que entran al agujero negro y ya no podrán escapar, ii) otros fotones solo cambiarán un poco su trayectoria y se alejarán del agujero negro, y iii) finalmente, existen unas geodésicas especiales en las que los fotones se moverán en círculos alrededor del agujero negro y posteriormente lograrán escapar hasta llegar a nuestros telescopios, y son precisamente estos los que nos generan la sombra del agujero negro.

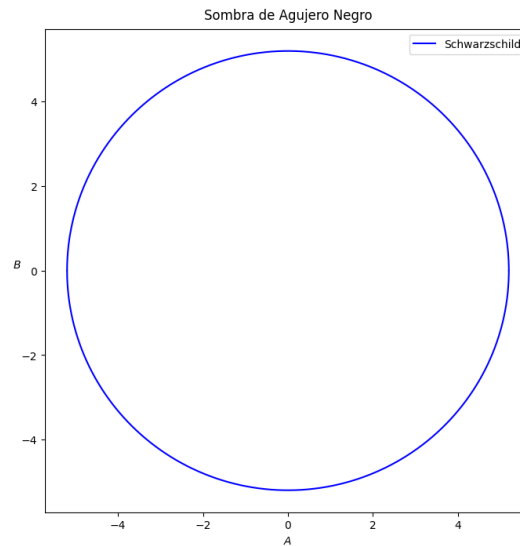


Figura 8. La sombra de un agujero negro de Schwarzschild

En el párrafo anterior mencionamos el hecho de que hay tres tipos de trayectorias que pueden seguir los fotones que giran alrededor de un agujero negro de Schwarzschild. En los dos primeros casos, no podemos estudiar precisamente nada con respecto al mismo, sin embargo el tercer caso es justo el que nos interesa. Como podemos apreciar en la imagen anterior, las geodesicas especiales que podemos ver desde la Tierra son círculos cuyo radio va a depender de la masa del mismo.

Conclusiones

La Relatividad General, es la teoría de la física que se ha encargado de estudiar objetos masivos en el universo: desde nuestro sistema solar, hasta los cúmulos de galaxias y el mismo comienzo del universo. Nos ha permitido entender un paradigma que se ha presentado desde que Newton escribió su Principia en 1687, originando la pregunta; ¿qué es la gravedad y cómo es que esta influye en el movimiento de los cuerpos celestes? La respuesta que fue dada por Einstein sigue influyendo más de un siglo y sigue dando frutos que podemos investigar hasta el día de hoy.

Sin embargo, el universo no solo ha sido el estudio de los objetos más masivos que existen en el cosmos, sino también, el estudio del microcosmos por el cual está conformado. La teoría cuántica, teoría que se ha encargado del estudio de estos objetos subatómicos y las fuerzas que los rigen. Nos ha mostrado no sólo el análisis del comportamiento de los mismos; nos abrió un paradigma que hoy en día, sigue generando controversias alrededor de la comunidad científica e intelectual.

A pesar de ello, ambas teorías han probado ser correctas en sus diferentes ámbitos, pero al ser ambas teorías modelos de nuestro universo ¿estas son acaso teorías que podamos ver una dentro de otra? Dicho en otras palabras, ¿ambas teorías están unificadas de alguna manera? La respuesta a la fecha ha sido un no, sin embargo, existen varias teorías que buscan explicar la unificación de ambos modelos de nuestro universo.



Figura 10. La conferencia Solvay de 1927 con los padres de la física contemporánea.

Los agujeros negros son de los objetos más misteriosos que existen en el universo. Mucho del desarrollo de la física teórica se ha dirigido a poder estudiarlos desde diferentes enfoques para poder encontrar uno que sintetice las propiedades de los mismos. Propiedades que no solo son relativistas, también se han encontrado propiedades dentro del mundo cuántico (e.g. la radiación de Hawking): las mismas propiedades quizás sean un puente que finalmente puedan resolver el misterio de la unificación de ambas teorías.

Sabiendo esto, el estudio de la sombra nos permite relacionar objetos que se pueden tratar en la física relativista y la mecánica cuántica; puesto que la luz juega un papel importante en ambas teorías. Es por eso que es imprescindible su estudio en los diferentes tipos de agujeros negros que podemos estudiar. Y quizás esa sea un puente más que podamos construir.

Bibliografía/Referencias

- Carroll, S. M. (2003). *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. Benjamin Cummings.
- Sasso, Daniele. (2012). Relativistic Theory of Black Holes. <http://vixra.org/abs/1201.0009>.
- Villegas, F. (2022). Sombra del agujero negro de Schwarzschild. *Revista de Investigación de Física*, 25(3), 40–44. <https://doi.org/10.15381/rif.v25i3.23592>.