

Sombra de un Agujero Negro

Black Hole Shadow

Guadalupe Berenice Herrera González¹

¹Universidad de Guanajuato. Campus León. División de Ciencias e Ingenierías
gb.herreragonzalez@ugto.mx¹

Daniel Alberto Medina Lugo²

²Universidad de Guanajuato. Campus León. División de Ciencias e Ingenierías
da.medinalugo@ugto.mx²

Mauricio Ángel Guerrero García³

³Universidad de Guanajuato. Campus León. División de Ciencias e Ingenierías
ma.guerrero.garcia@ugto.mx³

Luis Gustavo Martínez Gutiérrez⁴

⁴Universidad de Guanajuato. Campus León. División de Ciencias e Ingenierías
lg.martinezgutierrez@ugto.mx⁴

Grecia Teresa Ramírez Balderas⁵

⁵Universidad de Guanajuato. Campus Celaya-Salvatierra. División de la Salud e Ingenierías
gt.ramirezbalderas@ugto.mx⁵

Jaqueline Juárez Hidalgo⁶

⁶Universidad de Guanajuato. Campus Celaya-Salvatierra. División de la Salud e Ingenierías
j.juarezhidalgo@ugto.mx⁶

Gustavo Gutiérrez Cano⁷

⁷Universidad de Guanajuato. Campus León. División de Ciencias e Ingenierías
ggutierrezcano@ugto.mx⁷

Gustavo Niz Quevedo⁸

⁸Universidad de Guanajuato. Campus León. División de Ciencias e Ingenierías
g.niz@ugto.mx⁸

Resumen

En el presente artículo abordamos la manera en que vemos un agujero negro a través de su sombra, haciendo un repaso de la teoría de la relatividad, para finalmente hacer un resumen de lo trabajado en el verano de la ciencia.

Palabras clave: agujeros negra, relatividad especial, relatividad general, sombra de agujero negro.

¿Alguna vez has visto un Agujero Negro?

A lo largo del último siglo hemos presenciado como la vida cotidiana ha cambiado radicalmente, a tal punto, que, si comparásemos el día a día de alguno de tus tatarabuelos con el tuyo, son completamente diferentes. Nuestra realidad ha cambiado tanto con la urbanización y el avance tecnológico que en muchas ocasiones nos separamos de las preguntas que el ser humano se ha hecho desde hace siglos.

¿Qué son esos puntos brillantes en el cielo nocturno? Es una pregunta tan antigua como la humanidad misma, por lo mismo siempre se ha intentado dar razón de ser en cada cultura; en el antiguo testamento, se habla de la creación de las estrellas por Dios para iluminar la noche, o, por ejemplo, al ser niño preguntabas a tus padres ¿cuándo vendrán los reyes magos?, apuntaban hacia el cielo a 3 estrellas que parecían ir una detrás de otra, diciendo que eran ellos acercándose.

Una de las áreas del conocimiento que han cambiado radicalmente en los últimos cien años es la astronomía, por varias razones sucedió esto, diversos descubrimientos científicos ayudaron al desarrollo de nuevas maneras de ver el cielo; en su momento solamente podíamos ver lo que nuestros ojos nos permiten, pero ahora sabemos que hay más formas de “ver” que solamente con nuestros ojos.



Figura 1. Cinturón de Orión.

Esto suena curioso, pero antes de volver a esto, nos hace falta hablar de la herramienta que nos ha ayudado a saber que sucede en el amplio cosmos. A esta altura, es poco probable que alguien no haya oído hablar de Albert Einstein, se hacen cientos de documentales de él, se escucha a personalidades famosas decir que es su inspiración, hasta tiene una aparición en la película Oppenheimer. Sin embargo ¿Qué hizo?

Hacia el inicio del siglo veinte, Einstein publicó una serie de artículos, todos muy importantes, pero aquí solo nos interesan dos en específico, los que hablan acerca de la teoría de la relatividad, todos hemos oído de ella al menos una vez, ¿por qué? ¿qué la hace tan especial?

Hasta ese momento, los conocimientos científicos se ajustaban al sentido común, en este momento, dependiendo del lector puede que con duda chasqueara la lengua y dijese: “Obvio, ¿no?” Exactamente esto es lo que pensaban los científicos de la época, la ciencia tiene que ajustarse estrictamente a lo que vemos como normal. Esta perspectiva la cambiaron las dos teorías más famosas del siglo pasado, la teoría de la relatividad y la teoría cuántica, ambas teorías son ajenas a nuestra experiencia común y sin embargo podemos considerarlas ciertas.

El primer artículo de Einstein, parte de dos postulados, el primero lo podríamos escribir como que no hay un lugar especial en todo el espacio, con esto me refiero a que no importa donde este, todo lo puedo explicar con leyes físicas; por poner un ejemplo, si tengo dos imanes y acerco sus lados positivos, siempre se van a alejar uno del otro, no importa si estoy en la Tierra, en Saturno o a la deriva en el espacio.

El segundo postulado, es que la velocidad de la luz es una constante, puede no sonar raro esto, pero ¿qué implica? Si corre una persona a un kilómetro por hora, alguien que este parado lo verá correr a esa velocidad, pero si corre en el pasillo de un tren que se mueve a 100 kilómetros por hora, una persona fuera del tren lo vera correr a 101 kilómetros por hora, esto es lógico las velocidades se suman; sin embargo esto no pasa cuando hablamos de la luz, si encendiera un foco en el tren, dentro del vagón del tren, la luz tiene una velocidad de 300 mil kilómetros por segundo, y cuando alguien ve la luz desde afuera del tren, también lo verá con 300 mil kilómetros por segundo.

Esto es impresionante, no importa donde este, o como me mueva, la luz siempre se mueve a la misma velocidad, esto trae consigo una consecuencia muy importante en el tiempo. Desde las teorías filosóficas antiguas y con la mecánica de Newton se creía que el tiempo era un ente absoluto ajeno a lo demás, el tiempo fluye de la misma manera siempre; para la relatividad esto no es así, el tiempo no es absoluto.

Dentro de la teoría de la relatividad especial, el tiempo es relativo, de ahí el nombre de la teoría, mientras una persona viaje a una velocidad más cercana a la de la luz, para esa persona transcurrirá más lento el tiempo. Hay experimentos que se han realizado con los aviones más rápidos que tenemos, teniendo dos relojes ajustados a la misma hora, uno lo dejan en tierra y otro lo suben a un avión que despegue, al volver a tierra después de un viaje, se ha visto que el reloj que viajó se retrasó respecto al otro.



Figura 2. Albert Einstein.

Ahora solo nos falta un concepto más, la unión del espacio y del tiempo en un solo objeto, el espacio-tiempo; por la ciencia ficción es posible que hayas escuchado este término, sin embargo ¿cómo funciona esto? Cuando pensamos en el espacio, tomamos 3 direcciones, adelante-atrás, derecha-izquierda y arriba-abajo, podemos imaginar dar un paso en cualquiera de estas 3 direcciones, asumiendo que podemos flotar, sin embargo ¿cómo doy un paso en el tiempo?

De la misma manera que imaginamos un paso, podemos imaginar donde estuve ayer, o que haré mañana, pero cuando dejamos de imaginarlo, con el espacio puedo caminar o saltar, con el tiempo no puedo volver a comer lo que tanto me gustaba a los cinco años, ni puedo ir a ver una película que sale en dos años; con el tiempo no tenemos tanta libertad como con el espacio, con el tiempo siempre avanzamos hacia adelante sin poder detenernos, nuestra mente es la que lleva registro de esto con los recuerdos. Uniendo estas ideas, podemos considerar al tiempo de la misma manera que lo hacemos con el espacio, entonces si los juntamos obtenemos cuatro dimensiones, esto es el espacio-tiempo.

La mente humana tiene sus limitaciones, con el paso del tiempo se hace más difícil recordar algo que pasó hace mucho tiempo, ¿el universo mismo olvida las cosas al igual que nuestra mente? Probablemente alguna vez hayas oído “la luz del Sol, tarde aproximadamente 8 minutos en llegar a la Tierra”, ya hablamos de que la luz tiene una velocidad establecida, por ende, esto tiene sentido, 8 minutos es lo que tarda la luz en recorrer la distancia entre el Sol y la Tierra, sin embargo, si los humanos vemos la realidad a través de nuestros ojos cuando reciben luz, al ver en dirección al Sol, realmente vemos como se veía el Sol hace 8 minutos, ¡Estamos viendo hacia el pasado! Si tomamos esta idea, y analizamos los demás objetos luminosos del cielo, realmente lo que vemos es como se veían estos objetos hace miles o millones de años.

Estas ideas son sobre el primer artículo de Einstein, a esto lo conocemos como relatividad “especial”, por otro lado, el segundo artículo nos habla sobre la relatividad “general”; ¿Por qué especial y general?, sabemos que cuando un objeto no tiene aceleración, este estará quieto o se moverá a velocidad constante, la relatividad especial nos habla de este caso y la relatividad general nos habla del caso donde hay aceleraciones.

Para explicar de que habla la relatividad general, necesitamos hablar sobre la ecuación más importante de la teoría, la conocemos como ecuación de campo y es la ecuación que tenemos abajo. Parece sencilla (si ignoramos los índices inferiores), una igualdad de dos elementos $G_{\mu\nu}$ y $T_{\mu\nu}$, multiplicados por cuatro constantes, pero ¿Qué significan $G_{\mu\nu}$ y $T_{\mu\nu}$?

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Figura 3. Ecuación de Campo de Einstein.

$G_{\mu\nu}$, es el llamado “tensor de Einstein”, este objeto nos dice como se curva el espacio-tiempo, si es plano o curvo; y por el otro lado, $T_{\mu\nu}$ es llamado el “tensor de Energía-Momento”, este objeto suena más complicado, pero podemos interpretar que nos dice como se distribuye la materia en el espacio. Tenemos, por un lado, la curvatura del espacio-tiempo y por el otro la distribución de masa en el mismo espacio-tiempo; la ecuación nos dice que la materia le dice al espacio-tiempo como curvarse.

Esto es asombroso, esto significa que ¡yo curvo al espacio!, bueno sí y no, podemos curvarlo, pero esta curvatura es tan pequeña que es imposible verla, necesitamos mucha materia para curvar el espacio lo suficiente para que se pueda ver; para comprobar que el espacio-tiempo se curva, decidieron observar el objeto más grande que tenemos cerca, el Sol. Para esto querían ver que le sucedía a la luz de las estrellas que quedaban detrás del Sol durante su traslación, pero como el Sol da mucha luz, esperaron a un eclipse total de Sol. Si el espacio no se curva, perderemos la luz de las estrellas cuando pase el sol; si se curva el espacio, veremos que las estrellas detrás del Sol parecieran estar en otra parte, en las observaciones se confirmó lo segundo.

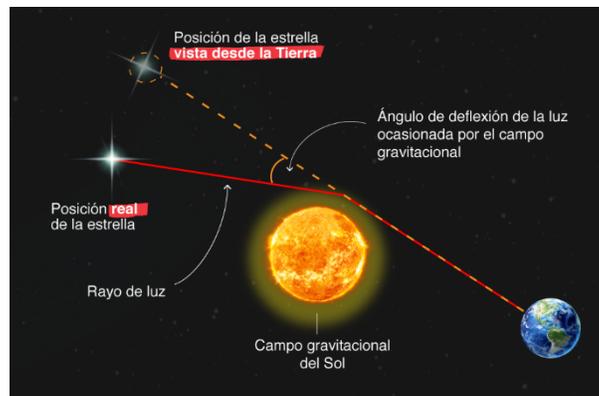


Figura 4. Fenómeno visto en el Eclipse.

Ahora que tenemos una idea de lo que nos dice la teoría de la relatividad, volvamos a esas otras formas de “ver”. Probablemente el lector conozca cómo vemos los humanos, nuestros ojos reciben los rayos de luz que reflejan los objetos y nuestro cerebro interpreta el resto, entonces ¿hay un solo tipo de luz? En la segunda mitad del siglo XIX, James Clerk Maxwell nos presenta una nueva teoría, el electromagnetismo; uniendo tres ramas de la física, electricidad, magnetismo y óptica, esta teoría respondió muchas preguntas, pero también nos iluminó acerca de la luz.

La luz es una onda electromagnética, sin entrar en detalles, pudimos entender cómo funciona la luz, y a su vez descubrimos que la luz que vemos es una pequeña parte de la luz existente; la luz visible es la que conocíamos, pero también hay más tipos, ondas de radio, microondas, infrarrojo, ultravioleta, rayos X y rayos gamma; probablemente todos estos tipos ya los conoces de una u otra forma.

Entonces la interrogante es, así como nuestros ojos pueden recibir e interpretar la luz visible ¿podemos crear un instrumento que haga lo mismo con los otros tipos de luz? Sí, estos son los telescopios y satélites, que se han desarrollado y utilizado por más de cien años, gracias a ellos hoy conocemos mucho más de lo que conocíamos del universo hace un siglo.

Hemos podido conocer las estrellas tan bien que podemos categorizarlas por tipos, tenemos tantos datos de planetas que sería imposible mencionar cada planeta que conocemos, incluso hemos descubierto la existencia de sistemas parecidos a los solares, pero muchísimo más grandes conocidos como galaxias. Sin embargo, hay un elemento que nos falta mencionar, un elemento tan conocido como misterioso, los agujeros negros.



Figura 4. Simulación computacional de un agujero negro.

Los agujeros negros son objetos celestes masivos, muchos más que el Sol, que tienen tanta gravedad que nada puede salir de ellos. Esto ¿qué significa?, cuando las misiones de la NASA para ir a la Luna se plantearon, ¿cómo podemos salir de la Tierra sin que la gravedad nos traiga de regreso?, pensaron que para poder desprenderse de la atracción gravitacional necesitaban una velocidad tan grande que le ganara a la gravedad, esta es la conocida como velocidad de escape; si lo pensáramos para cualquier objeto, esta velocidad necesaria, es más grande conforme más pesado sea el objeto o mientras más cerca del objeto se esté.

Para el caso de un agujero negro, mientras más nos acerquemos a este, necesitaremos una velocidad más alta para poder ganarle a la gravedad del agujero negro, hasta que llegue un punto en el que ni siquiera la luz pueda salir, esto es conocido como el horizonte de eventos, una región alrededor del agujero negro de la que nada puede huir; como ni la luz puede salir, no lo podemos ver con luz por eso el nombre. Esto entonces hace imposible el ver un agujero negro ¿no?, si vemos con luz, pero la luz no puede salir ¿cómo podríamos ver un agujero negro? Si bien esto es cierto, no podemos ver directamente un agujero negro, podemos verlo por métodos indirectos, viendo su sombra.

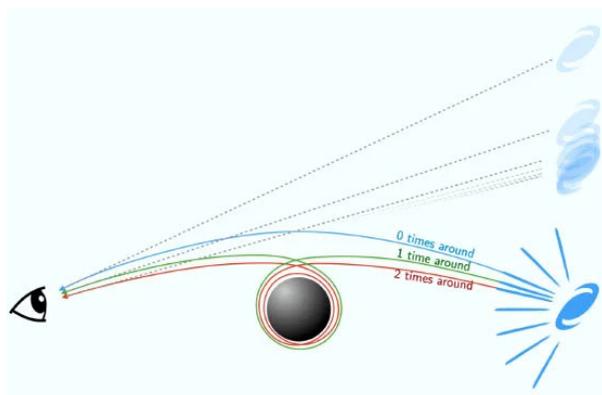


Figura 5. Visualización de la esfera de fotones.

Cuando tenemos un agujero negro primero necesitamos saber su forma, esta la encontramos a partir de su esfera de fotones; cuando la luz de las estrellas que están detrás del agujero negro se acerca, sigue un camino similar al que vimos con el eclipse, sin embargo, en este caso la atracción del agujero negro es tan grande que obliga a la luz a orbitar al agujero negro y luego seguir su camino, esto es la esfera de fotones.

El otro elemento importante para visualizar al agujero negro es el disco de acreción, hasta el momento pensamos en una bola gigante solitaria en el espacio, sin embargo, ¿qué pasa si la ponemos sobre el espacio con todo el material cósmico que eso implica?, el agujero negro lo atraería, formando algo parecido a que si llenamos una tina y le quitamos el tapón; un remolino de materia cayendo al agujero negro.

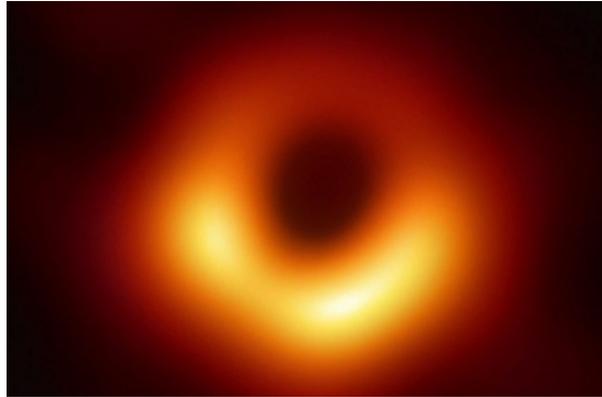


Figura 6. Fotografía de M87, primera fotografía de un agujero negro.

En la figura 6, tenemos la primera fotografía de un agujero negro, el agujero negro M87* que se localiza en el centro de la galaxia Messier 87 a unos 55 millones de años luz de nosotros. Se ve borroso, entiendo que no es tan impresionante como la figura 4 que es una simulación de computadora utilizada en la película Interstellar, sin embargo, es la primera fotografía real que tenemos, y actualmente se está trabajando para mejorarla.

Si vemos la imagen se aprecia un anillo en tonos de naranja y amarillo, esto es el disco de acreción y la parte luminosa más cercana al agujero negro es la sombra del agujero negro, tiene ese nombre porque justamente es lo que parece; como mencioné la fotografía se está mejorando y la versión más nueva que tenemos está en la figura 7. En esta imagen podemos ver mejor la forma del disco de acreción.

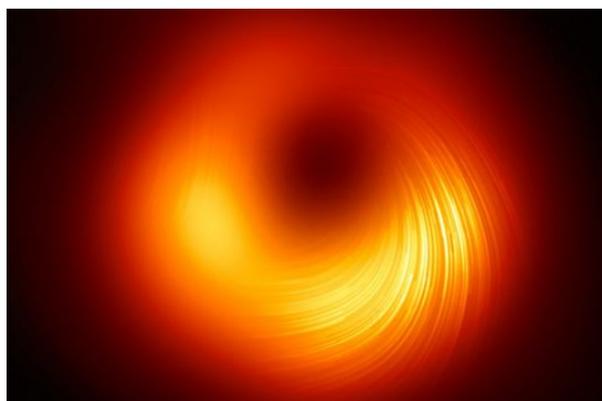


Figura 7. Fotografía mejorada de M87.

Verano de la ciencia

A lo largo de este programa, replicamos los cálculos presentados del cálculo de la sombra de un agujero negro de Schwarzschild; este tipo de agujero negro es la primera aproximación desde Relatividad General a este tipo de objeto celeste, es una solución a la ecuación de campo de Einstein, con unas características muy particulares, es “estático”, tiene “simetría esférica”, está en el vacío y su tamaño solo depende de su masa.

Primero a qué nos referimos al decir estático, es una palabra que utilizamos en física para describir un sistema que no está rotando, por otro lado, por simetría esférica nos referimos a que es un objeto que al rotarlo lo vemos siempre de la misma forma como si fuera una pelota de un color sólido. Nuestro viaje hacia la descripción de la sombra del agujero negro comenzó al buscar la esfera de fotones, necesitábamos definir cómo se comportan los fotones al someterlos a la atracción gravitacional de un agujero negro de Schwarzschild, para hacer esto utilizamos un método análogo al de Newton, el método de Hamilton-Jacobi, sus ecuaciones sin embargo parecían no decirnos lo que buscábamos.

Este método nos daba cuatro ecuaciones, para cada una de las dimensiones del espacio-tiempo, sin embargo, cuando apuntamos un telescopio al cielo no podemos ver esas cuatro dimensiones, lo que podemos ver en la bóveda celeste es una proyección en dos dimensiones, como si fuera una hoja, teníamos que pasar de cuatro dimensiones a solo dos, a estas coordenadas especiales las conocemos como coordenadas celestes o celestiales, de esa forma pudimos encontrar la forma que tiene la sombra del agujero negro de Schwarzschild. La grafica siguiente son las sombras que obtuvimos durante el verano.

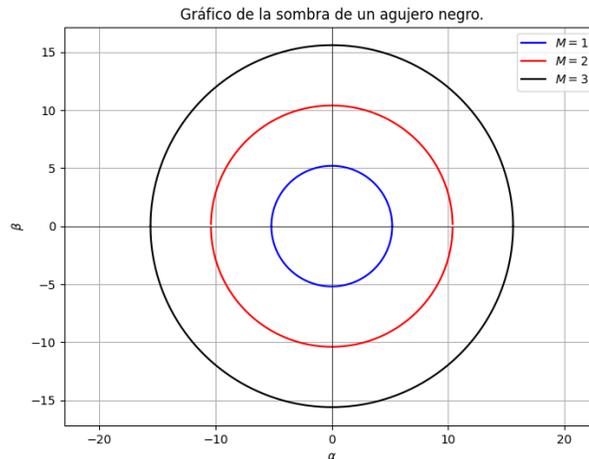


Figura 8. Grafica de la sombra de un agujero negro de Schwarzschild.

El tamaño de la sombra al igual que el tamaño del agujero negro solo depende de su masa, como vemos en la Figura 8 si el agujero negro tiene mucha masa su sombra será más grande, y además también dependerá a la distancia a la que se encuentra del observador.

Bibliografía/Referencias

- Araujo, A. (2020). El Espacio-Tiempo antes de Einstein. Naukas. <https://naukas.com/2020/03/07/el-espacio-tiempo-antes-de-einstein/>
- Araya. O. (2022) Albert Einstein. Meer <https://www.meer.com/es/70173-albert-einstein>
- Barajas, F. (2014). Interstellar y la construcción de un hoyo negro. Código Espaguetti. <https://codigoespaguetti.com/noticias/ciencia/interstellar-hoyo-negro/>

- BBC News Mundo (2021). Qué revela la nueva imagen del agujero negro supermasivo que por primera vez nos mostró cómo son estos monstruos gravitacionales. BBC News Mundo.
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-56517869>
- Bernstein, J. (1994). Quarks, Chiflados y el Cosmos. Alianza Editorial. Sa.
- Cantarutti, L. (2009). Eso que llamamos "Tiempo" – Newton vs. Leibniz. El Cedazo.
<https://eltamiz.com/elcedazo/2009/02/03/eso-que-llamamos-tiempo-newton-vs-leibniz/#:~:text=Si%20el%20tiempo%20es%20homog%C3%A9neo,la%20naturaleza%20homog%C3%A9nea%20del%20tiempo.>
- Carrasco E. (1999). Astronomía de 1900 a 1999. Diario Síntesis.
https://www.inaoep.mx/~rincon/cien_anyos.html#:~:text=En%201900%20no%20se%20sab%C3%ADa,0%20las%20estrellas%20de%20neutrones.
- Ghosh, P. (2019). Así es la primera foto de un agujero negro, captada por el Event Horizon Telescope: "Un absoluto monstruo" tres millones de veces más grande que la Tierra. BBC News.
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-47880446>
- Hartle, J. (2003) Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity. Addison Wesley.
- Vicente, P. (2020). Fotografiando Agujeros Negros. Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid
- Vieyro, F. (2021). La Sombra de un Agujero Negro. Boletín de Divulgación Científica y tecnológica del IAR.
<https://www.iar.unlp.edu.ar/boletin/la-sombra-de-un-agujero-negro/>
- Villegas, F. (2022). Sombra del Agujero Negro de Schwarzschild. Revista de Investigación de Física 25.