

# Teoría de la Relatividad y Hoyos Negros

Martha Guadalupe del Consuelo Ulloa Calzonzin, Óscar Gerardo Loaiza Brito, Juan Pablo Aranda Lozano

<sup>1</sup> [Colegio de nivel medio superior de León, Universidad de Guanajuato] | [martha\_ulloa@outlook.es]

<sup>2</sup> [Departamento de física, División de ciencias e ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato] | [oloaiza@fisica.ugto.mx]

<sup>3</sup> [Colegio de Nivel Medio Superior, Campus León, Universidad de Guanajuato] | [pabloaranda@hotmail.com]

## Resumen

La física de Newton funcionó a lo largo de 300 años, pero después de este tiempo aparecieron algunos científicos que postulaban nuevas teorías para la física que no eran compatibles con la física clásica como el electromagnetismo. En 1905 y 1915 Albert Einstein postula dos teorías con las cuales la sociedad de científicos comienza a replantearse lo que antes daban por hecho: los postulados de la física clásica ya no eran suficientes para describir las nuevas innovaciones de la física. Se construyeron dos nuevas teorías llamadas especial de la relatividad y relatividad general: ambas teorías describen el comportamiento del universo. Una parte importante que abarca esta descripción es el espacio en que nos movemos. Las coordenadas dependen del estado de movimiento del observador, un ejemplo de ellos son los hoyos negros. Einstein utilizó modelos matemáticos para la solución de sus teorías y una de estas soluciones encontrada por Schwarzschild describe un hoyo negro, objeto masivo de cuyo interior no escapa ni siquiera la luz. En este trabajo se describirán las principales ideas que dan origen a la existencia de hoyos negros así como las principales consecuencias de su presencia en la distorsión del espacio y del tiempo.

## Abstract

La teoría de la relatividad da múltiples resultados a ecuaciones que respaldan la teoría, cada solución describe fenómenos y objetos diferentes, pero tienen en común que describen el comportamiento del universo. Se buscó comprender esta teoría para llevar el seguimiento a la solución de Schwarzschild, que nos describe a un tipo de hoyos negros. A lo largo de la investigación se buscó a través de procedimientos matemáticos y experimentos mentales que cada ecuación que describía un fenómeno en particular de la física tuviera una base sólida en la realidad, hemos llegado así a describir las propiedades que tiene un hoyo negro, y demostrado la posible existencia de estos objetos masivos.

## Palabras Clave

Física teórica; Relatividad especial; Relatividad general; Hoyos negros;

## INTRODUCCIÓN

El presente artículo habla de cómo un hoyo negro llega a ser un objeto que es descrito por la relatividad especial a través de un procedimiento matemático, describiendo así el efecto de la relatividad en presencia de un campo gravitacional que distorsiona al espacio-tiempo.

La física clásica se rige por la leyes de Newton; al parecer esta física describía perfectamente las fuerzas que interactuaban en la naturaleza, pero el propio Newton se dio cuenta que su teoría fallaba en la gravedad, pues no describía la razón de la existencia de la fuerza de gravedad ni como interactuaba a grandes distancias así cuando los cuerpos involucrados no estaban en contacto.

La física progresó con base en las leyes de Newton, hasta que Maxwell propuso las leyes del electromagnetismo, las cuales no eran compatibles con la física newtoniana sugiriendo que la descripción de los fenómenos electromagnéticos no estaba completa. Entonces Einstein comienza a hacer aportes a la física en 1905, confirmando las leyes de Maxwell y diciendo con su teoría que la física de Newton era incorrecta.

Al cabo de años y de varios experimentos se confirmó teóricamente y en la práctica que las ideas de Maxwell y Einstein eran correctas. Los físicos empezaron a trabajar en la teoría de Einstein buscando soluciones posibles a las ecuaciones, recuperando curiosidades matemáticas, entre ellos los objetos oscuros de Laplace y las transformaciones de Lorentz.

Después de meses de publicado el último artículo de Einstein, Schwarzschild encuentra una solución a la ecuación, la solución nos describe un agujero negro.

## Física antes de Albert Einstein

Galileo en la antigüedad había estudiado como se comportaba la física en presencia de dos observadores diferentes, encontrando que la física era la misma en diferentes sistemas inerciales donde el tiempo considerado era absoluto; estas dos ideas fueron los componentes de “La relatividad de Galileo”.

Posteriormente Newton enunció las tres grandes leyes de la física clásica; ley de la inercia que describe que: Un cuerpo permanecerá en movimiento rectilíneo uniforme o en reposo a menos que una fuerza externa lo modifique; ley de la masa inercial: La aceleración de un objeto será proporcional a la fuerza aplicada sobre él;  $F=ma$ , y la tercera llamada de acción-reacción que nos dice que a toda acción corresponde una reacción de igual magnitud, igual dirección y sentido contrario.

Los físicos durante mucho tiempo creyeron que la física de Newton era correcta y que no había nada más que hacer en el campo de la física. Newton se dio cuenta que la teoría que él había postulado no era acorde con su propia teoría de la gravitación: un ejemplo muy claro es la incompatibilidad de la tercera ley y la gravitación, pues no existe una fuerza antigravitatoria, pero ignoró este “pequeño” problema.

Años más tarde a finales del siglo XIX James Clerk Maxwell anunció las leyes del electromagnetismo que describen la electrodinámica de los cuerpos eléctricos y magnéticos de manera unificada [1], sin embargo la teoría contradecía a Newton, y esto era impensable, generó sospechas sobre la plausibilidad de la teoría electromagnética.

Dos científicos Albert Michelson y Edward Morley realizaron un experimento, en el cuál median con un interferómetro la velocidad de la luz y demostraron que la velocidad de la luz era invariante ante diferentes observadores sin importar si sus sistemas de referencia se movían o no y no dependía de su velocidad, la propia naturaleza validaba a la teoría electromagnética, la

que demostró que la luz era ajena a la relatividad de Galileo, pues su velocidad era siempre la misma independientemente del observador.

### Teorías de la relatividad

En 1905, Einstein publicó cinco artículos [2], uno de ellos llamado “sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”, concordaba con el experimento de Michelson-Morley. También afirmaba que la velocidad, tiempo y longitud son relativos al observador, por tanto el orden en que suceden dos acontecimientos en el universo es relativo a quién los observa. El tiempo transcurrirá según la velocidad relativa de quién lo mida; teniendo en mente dos sistemas de referencia, mientras más se acerca un observador a la velocidad de la luz, mayor será la diferencia de tiempos para cada sistema.

Lo mismo sucederá para la longitud, esta se modificará pero a diferencia del tiempo que se dilata, esta aparentará contraerse a ojos del observador en el sistema inercial. La diferencia entre un sistema y otro dependerá de que tan cerca esté la partícula de la velocidad de la luz, mientras más cerca a la velocidad de la luz, mayor será la transformación.

Para hacer el cambio de un sistema de referencia a otro, se utilizan las transformaciones de Lorentz y la métrica del espacio-tiempo de Minkowski [4], ambos principios eran simples curiosidades matemáticas, pero después junto al tiempo propio de una partícula fueron de gran utilidad para explicar el cambio de un sistema acelerado a uno inercial.

Con base en experimentos y cálculos matemáticos Einstein llegó a la conclusión que una partícula masiva no puede viajar a la velocidad de la luz, pues se necesitaría una energía infinita para llegar a los 300 000 km/s que viaja la luz, hecho demostrable con la ecuación

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

donde E tiende al infinito mientras v se acerca a la velocidad de la luz.

Así mismo la teoría de la relatividad donde el espacio y tiempo están relacionados; el tiempo es la cuarta dimensión; y por ello tiene sentido hablar de movimientos en el tiempo, pues un objeto que se encuentra en reposo se está moviendo hacia el futuro.

Similarmente Albert Einstein postuló que todos los cuerpos por existir tienen energía almacenada en su masa aun cuando se encuentran en reposo, según Einstein la masa de cualquier objeto puede transformarse en energía, proceso por el cual las estrellas brillan. Entonces, la masa es la energía esperando ser liberada, un principio fundamental de la física nuclear. Respaldando este descubrimiento, se encuentra la ecuación más famosa de la física  $E=mc^2$ .

La relatividad especial fallaba cuando se presentaban eventos físicos en sistemas no inerciales además no era compatible con la teoría de la gravedad newtoniana.

Al intentar dar solución a este problema, gravedad-relatividad, surge la teoría general de la relatividad. Se estructura la teoría con base en “el principio de equivalencia”, que a continuación se enuncia: Todo lo que suceda en un sistema acelerado, pasara en otro en presencia de gravedad.

Como consecuencia de la teoría especial de la relatividad, se descubrió que debido a la aceleración de la fuerza de gravedad y a la masa de los objetos, el espacio-tiempo sufre una modificación curvándose.

La luz al moverse en el espacio tiempo, sufre interacción con la gravedad; un ejemplo de esto es el efecto de un eclipse, que al tapar la luna al sol, y al pasar la luz de una estrella cerca de la luna en dirección a la tierra, desvía su trayectoria por la gravedad que el sol ejerce en ella y esta llega desviada a la tierra, localizando a la estrella en una región en que no se encuentra.

Ya se dijo que la masa y aceleración de un objeto generan la fuerza de gravedad, que se manifiesta en un campo gravitatorio, que emite el objeto masivo, y ejerce su fuerza sobre otros objetos con menor masa a él.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Un físico-matemático llamado Laplace contemporáneo de Newton propuso la existencia de objetos masivos oscuros [5]; dichos objetos tenían que cumplir con varias propiedades, una de ellas era ser altamente masivos, tan masivos como la tierra compactada en una esfera de 0.8 cm. Y donde la luz no pudiera escapar. Laplace siguió un razonamiento en el que consideraba la velocidad de escape de un cuerpo desde un objeto que ejerce fuerza de gravedad en él, con la ecuación obtenida, era sencillo darse cuenta del radio que un objeto debería tener para no permitir que la luz alcanzara tal velocidad de escape.

Pero durante la época que vivió Laplace esto era impensable, pues no existía razón alguna para asegurar que la luz interactuara con la gravedad y no pudiera escapar de un cuerpo ni había por qué pensar que un cuerpo fuera más masivo que el sol; la idea era absurda y quedó descartada.

Con la revolución de la física que produjo la teoría de la relatividad, se volvieron a reconsiderar muchos hechos en la física que se daban por verdades absolutas, y los científicos se dieron a la tarea de revisar aquellas curiosidades que no eran compatibles con la Física clásica.

Meses después de publicados los artículos de Einstein, el científico Schwarzschild presentó a la comunidad científica una solución a la ecuación de Einstein. Esta solución es de las más sencillas que existen en esta teoría, y nos describe un objeto, el objeto oscuro de Laplace, pero ahora con la teoría apoyando su existencia y todo un análisis matemático detrás de este cuerpo, es posible conocer más de su comportamiento y propiedades. Este objeto es al que conocemos como un hoyo negro.

La solución de Schwarzschild a las ecuaciones de Einstein es la siguiente:

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

Lo que describe la ecuación es un objeto altamente masivo que genera un gran campo gravitatorio que curva el espacio-tiempo, el campo gravitatorio es el culpable de atraer hacia él los objetos, de ahí la frase común “un hoyo negro se traga todo”, aunque no funciona exactamente así; atraerá aquello que este dentro de su campo de gravedad, no más. En realidad, [6] existe una zona donde efectivamente es imposible escapar de un hoyo negro al menos teóricamente. En la solución de Schwarzschild se llama horizonte de sucesos; al atravesar este, el tiempo y el espacio se invierten, ocupando el tiempo lo que antes era espacio y el espacio lo que era tiempo. Para escapar de ahí es necesario superar la velocidad de la luz, pues ni ella puede escapar del punto de no retorno.

Otra cualidad es la de ser un cuerpo estático pues la solución está calculada para una esfera, donde el momento angular siempre se mantiene, de ahí que sea muy poco probable que en realidad exista un hoyo negro de Schwarzschild, pero si cambiamos las aproximaciones las características no deberían cambiar mucho, es decir, seguimos teniendo un hoyo negro.

Un problema ocurre en lo que se llama singularidad, lugar dónde toda la masa que adquiere el hoyo negro caerá y será inevitablemente destruida, si es que no ha sido destruida anteriormente por la fuerza gravitatoria, la radiación o la temperatura. El destino final de un observador en caída libre a un hoyo negro es sin duda la aniquilación total, es decir la singularidad. En la singularidad, todas las teorías conocidas al momento, dejan de funcionar, de ahí la importancia de estudiar, qué sucede ahí.

Volvamos al hoyo negro en general, su campo de gravedad altera el espacio-tiempo, el objetivo del verano de investigación en el centro de ciencias e ingenierías de la universidad de Guanajuato ha sido describir un hoyo negro de Schwarzschild, para calcular la dilatación del tiempo más allá del horizonte de sucesos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un hoyo negro es una solución matemática, a la ecuación de Einstein. La más simple es la solución de Schwarzschild, es un objeto masivo que no permite el escape de la luz, es esférico y genera un campo gravitacional que modifica el espacio-tiempo. Dado que un rayo de luz tiene un intervalo de espacio tiempo nulo, se tiene

$$c^2 dt^2 \left(1 - \frac{2MG}{c^2 r}\right) = \frac{1}{\left(\sqrt{1 - \frac{2MG}{c^2 r}}\right)^2} dr^2,$$

y de aquí se calcula:

$$d\tau = \frac{dt}{\sqrt{1 - \frac{2MG}{c^2 r}}}$$

Donde  $d\tau = \frac{ds^2}{c}$ , obteniendo la diferencia en la dilatación del tiempo que existe entre un observador que se encuentra, dentro del hoyo negro, y un observador donde no afecta la fuerza gravitacional del hoyo negro, es decir que se encuentre en un espacio plano.

Existen objetos en el espacio exterior que aparentan comportarse como un agujero negro. La investigación sobre lo que sucede en la singularidad de un hoyo negro será sin duda un avance importante en la física actual.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se calculó y comprobó que en la vecindad de un agujero negro no rotante, el tiempo transcurre más lentamente que en relación a un

observador muy lejos del agujero negro la diferencia entre la percepción del tiempo de ambos observadores depende directamente de la masa del agujero negro e inversamente de la distancia a la que se encuentren de él. Por último es importante remarcar que estos efectos se aplican a cualquier objeto masivo, incluida la tierra. Por lo tanto existe, y ha sido comprobada una diferencia en intervalos de tiempo dependiendo de la altura del observador en la propia tierra.

## AGRADECIMIENTOS

Gracias al Dr. Óscar Loaiza por toda su paciencia y entusiasmo en el trabajo, por resolver mis dudas, y ayudarme a resolver el ¿Por qué? de muchas cosas, por mostrarme a alguien que realmente ama su trabajo. Gracias a la universidad de Guanajuato, por hacer posible este verano.

## REFERENCIAS

- [1] <https://www.youtube.com/watch?v=7WF-adJRyF0> Fecha de consulta 17 Junio 2015;
- [2] [https://www.youtube.com/watch?v=LKMuwY\\_Eiil](https://www.youtube.com/watch?v=LKMuwY_Eiil) Fecha de consulta 15 junio de 2015;
- [3] Shahan Hacyan (1996). Relatividad para principiantes (5ta reimpresión) México, Fondo de cultura económica. ;[4] M. Wald, (1998). Espacio, tiempo y gravitación: La teoría del "Big Bang" (la gran explosión) y los agujeros negros (2da edición). Ciudad: México, Fondo de cultura económica; [5] Cuentos cuánticos,(text/html), Fecha de consulta 07 de julio de 2015/ Página actualizada 16 de julio de 2015, <http://cuentos-cuanticos.com/>; [6] Shahan Hacyan (2003). Los hoyos negros y la curvatura del espacio tiempo.(3ra edición) México, Fondo de Cultura Económica. Laura Mears (2015). 50 datos increíbles sobre los agujeros negros: Todo sobre el espacio, volumen (1), pp. 42-54.