

# Centro Universitario México

## Agujeros Negros a la Luz de la Relatividad

Integrantes:  
Alejandro Mejía Ávila  
Jessica Ramos Ortega

Asesor:  
Prof. Jesús Flores Téllez

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

Existen en nuestro universo numerosos problemas y sucesos que rebasan nuestra capacidad de comprensión. Nuestra habilidad de explicarlos se basa solo en especulaciones que, a menudo a la luz de los años y el conocimiento, resultan erróneas y hasta absurdas, llevándonos a nuevas formas de pensamiento que nos permiten descubrir, partiendo de aquellas ideas erróneas, las verdaderas respuestas que el universo nos oculta. Estas explicaciones estriban en la capacidad de algunos hombres de pensar e imaginar soluciones que descifren estos fenómenos y nos permitan avanzar un peldaño más hacia la comprensión de nuestro cosmos.

En el pasado, e incluso en el presente, encontramos en nuestros sentidos un obstáculo para el entendimiento de los fenómenos que suceden en nuestro universo. Es por estos obstáculos que muchas ideas fueron consideradas en principio absurdo y negado por quienes adoptaron ideas basadas en la lógica de sus percepciones sensoriales.

Como Gastón Bachelard decía: *“los obstáculos externos no se encuentran necesariamente en la complejidad y la fugacidad de los fenómenos ni de incriminar la debilidad de los sentidos y del espíritu humano: Es en el acto mismo de conocer, donde aparecen, por una especie de necesidad funcional, lentitudes y perturbaciones, a los cuales llamo obstáculos epistemológicos. Debido a este tipo de obstáculos lo real nunca es lo que se podría creer, pero es siempre lo que se habría debido pensar.”*

Las ideas que llevaron a la relatividad son un ejemplo de estas concepciones erróneas que fundamentaron, lo que parece ser, una solución a las preguntas que no habían sido resueltas.

A finales del siglo XIX algunos de los obstáculos que el hombre de ciencia encontró para alcanzar una teoría de la relatividad, como fue enunciada posteriormente por Einstein en principios del siglo XX, fueron entre otros: 1) la idea de Newton sobre la posible existencia de un *sistema de referencia absoluto* y su búsqueda; 2) la concepción de una sustancia hipotética llamada *éter*, como el medio material necesario para transportar las ondas electromagnéticas y la luz, y de que este era el sistema de referencia absoluto respecto al cual podemos saber si algo se mueve o se mantiene en reposo; 3) pensar que el espacio estaba regido estrictamente por la *geometría Euclidiana* donde la distancia más corta entre dos puntos es una línea recta.

El primer obstáculo fue salvado por Einstein, cuando en su teoría de la **Relatividad Especial** postula que es imposible detectar un sistema de referencia absoluto y que las leyes de la física son las mismas en cualquier sistema de referencia inercial. El segundo obstáculo es derrumbado cuando postula que la velocidad de la luz es constante para cualquier observador en movimiento relativo.

El último obstáculo se pone de manifiesto, cuando Einstein hace extensiva su teoría de la Relatividad Especial a sistemas de referencia no inerciales, es decir, cuando crea la teoría de la **Relatividad General**, y en la cual encontró que la gravedad curvaba el espacio haciendo imposible que la geometría Euclidiana explicara estas deformaciones, obligándolo a adoptar nuevas concepciones del espacio y el tiempo, en las cuales la distancia más corta entre dos puntos es una línea llamada **“geodésica”**.

Un ejemplo de los efectos de la curvatura del espacio-tiempo es el corrimiento al rojo que tienen los fotones al tratar de escapar del efecto de la gravedad en una estrella muy masiva, que ya en el pasado, científicos como Laplace, habían predicho la posible existencia de estrellas con masas y radios tales que, la velocidad de escape fuera igual o mayor a la velocidad de la luz.

Actualmente el avance de la tecnología ha permitido detectar cuerpos celestes con características extraordinarias que llevan a sus límites a la *Física*, y son llamados **hoyos negros**. Estos son singularidades del espacio cuya densidad de masa es enorme lo que impide que cualquier tipo de materia e incluso la luz escape de ellos.

### Resultados.

#### Relatividad General:

Principio de equivalencia:

Uno de los pilares que se fundamente la relatividad general es el principio de equivalencia de la gravitación y la inercia, el cual menciona que las observaciones hechas en un marco de referencia acelerado no pueden diferenciarse

de las que se hagan en un campo gravitacional newtoniano. Esta equivalencia no tendría importancia si sólo se aplicara a los fenómenos mecánicos, pero Einstein fue más allá y afirmó que el principio se cumple para todos los fenómenos naturales.

Que la masa inercial sea igual a su masa gravitacional significa que la energía asociada a un campo gravitacional induce efectos de atracción gravitatoria, al igual que la materia, en virtud de la equivalencia entre masa y energía, según los resultados de la relatividad especial. De manera similar, el hecho de que todo objeto dentro de un campo gravitacional tenga una aceleración de caída libre que es independiente a su masa, significa que tal aceleración es una propiedad del campo mismo. Si se considera el continuo espacio-tiempo como un espacio geométrico de cuatro dimensiones, entonces las trayectorias naturales que siguen los objetos se adoptan como líneas geométricas.

Aplicando el principio de equivalencia imaginemos que todo sistema acelerado puede considerarse como un sistema inercial pero si se encuentra situado en un campo gravitatorio; igualmente podemos asimilar todo punto o región de un campo gravitatorio a un espacio en estado de aceleración. Partiendo de esto y aplicando las ecuaciones de Minkowski, estas se convierten en ecuaciones que equivalen a decir que los ejes coordenados son curvos, es decir, que el espacio se curva hacia la cuarta dimensión en presencia de un campo gravitatorio. Así el espacio tiempo deja de ser Euclidiano como suponía Minkowski en su espacio cuatridimensional de la relatividad especial; y se convierte en una geometría de Riemann. Por medio del cálculo tensorial se puede llegar a la métrica de Schwarzschild que es el caso más simple en la relatividad general y a otras métricas más complejas.

La conclusión a la que se llega es que la gravedad no es una fuerza en si misma sino que es el resultado visible de una deformación del espacio tiempo en presencia de una masa; y está definida en las ecuaciones de campo de Einstein, es decir la gravedad queda reducida a pura geometría

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

Estas ecuaciones forman un sistema de 10 ecuaciones diferenciales de 4 dimensiones y relacionan la geometría del espacio-tiempo (G), con la distribución de materia y energía (T). Así, Einstein dedujo que el espacio se curva alrededor de una masa.

Algunas advertencias sobre la ecuación de Einstein deben hacerse. En primer lugar, el lado izquierdo de la ecuación no es la curvatura total del espacio-tiempo, sino sólo una parte de ésta. Por lo tanto, fuera de la distribución de la materia (donde el lado derecho de la ecuación de Einstein será cero) el espacio-tiempo será en general todavía curvo, es decir, estará presente un campo gravitatorio.

### **Agujeros negros:**

El termino agujero negro tiene un origen muy reciente. Fue acuñado en 1969 por el científico norteamericano John Wheeler como la descripción grafica de una idea que se remonta por lo menos doscientos años, a una época en que había dos teorías sobre la luz una que suponía que la luz estaba conformada por partículas y otra que asumía que estaba formada por ondas. Hoy en día sabemos que ambas teorías son correctas. Debido a la dualidad onda-corpúsculo de la mecánica cuántica la luz puede ser considerada como onda y partícula. Si se pensaba que la luz estaba compuesta por partículas se podría esperar que estas fueran afectadas por la gravedad del mismo modo que todo en el universo. Al principio se pensaba que la luz viajaba con infinita rapidez de forma que la gravedad no hubiera sido capaz de frenarlas. Cuando Röemer descubrió que la luz viaja a una velocidad finita significo el que la gravedad pudiera tener un efecto importante sobre la luz.

Bajo esta hipótesis John Michell escribió en 1783 un artículo en el Philosophical Transactions of the Royal Society of London en el que señalaba que una estrella suficientemente masiva y compacta tendría un campo gravitatorio tan intenso que la luz no podría escapar, es decir, que la luz emitida desde la superficie de esa estrella sería arrastrada de vuelta hacia el centro por la atracción gravitatoria de la estrella. Michell sugirió que podría haber numerosas estrellas de este tipo que a pesar de que no seríamos capaces de verlas, pues su luz nunca nos llegaría, si seríamos capaces de notar su atracción gravitacional. Estos objetos son lo que hoy en día conocemos como agujeros negros. Una sugerencia similar fue realizada pocos años después por el científico francés marqués de Laplace.

En realidad no es realmente correcto hablar de la luz como un objeto con masa gravitatoria porque la velocidad de la luz es fija. No fue hasta la relatividad general de Einstein e incluso mucho tiempo después que se pudo entender las implicaciones de la teoría acerca de las estrellas masivas.

Cuando la estrella se contrae el campo gravitatorio en su superficie se hace más intenso y los conos de luz se curvan hacia dentro. Esto hace más difícil que la luz de las estrellas escape y la luz parece más tenue y más roja para un observador distante.

Finalmente cuando la estrella se ha contraído hasta un cierto radio crítico, el campo gravitatorio en la superficie se hace tan intenso que los conos de luz están tan inclinados hacia dentro que la luz ya no puede escapar. Según la teoría de la relatividad nada puede viajar más rápido que la luz por lo tanto si la luz no puede escapar ninguna otra cosa puede hacerlo: todo es retenido por el campo gravitatorio. De este modo hay un conjunto de sucesos, una región del espacio-tiempo de la que no es posible escapar para llegar a un observador distante. Su frontera se denomina horizonte de sucesos. Coincide con las trayectorias de los primeros rayos luminosos que dejan de escapar del agujero negro.

Para entender lo que sucedería si pudiéramos observar el colapso de una estrella para formar un agujero negro hay que recordar que para la teoría de la relatividad no existe un tiempo absoluto. El tiempo para alguien situado sobre una estrella será diferente del tiempo para alguien situado a cierta distancia debido al campo gravitatorio de la estrella.

Supongamos que un astronauta está situado en la superficie de la estrella en colapso; y enviara una señal luminosa cada segundo según su reloj, a su nave espacial en órbita entorna a la misma estrella. En algún instante, la estrella se contraería por debajo del radio crítico y su campo gravitatorio se haría tan intenso que las señales ya no llegarían a la nave espacial ya que se distribuirían sobre un periodo de tiempo infinito visto desde la nave espacial.

El intervalo de tiempo entre cada onda se haría cada vez mayor y con ello la luz procedente de la estrella se haría tan oscura que ya no podría verse y todo lo que quedaría sería un agujero negro en el espacio.

Según la relatividad general debe haber una singularidad de densidad infinita dentro del agujero negro; resulta similar al Big Bang en el comienzo del tiempo solo que este sería el final del tiempo para el astronauta y el cuerpo que colapsa. En esta singularidad las leyes de la física y nuestra capacidad para predecir el futuro dejarían de ser validas. Sin embargo cualquier observador que permaneciera fuera de la singularidad no se vería afectado por esto.

### **Análisis de resultados:**

De la investigación podemos decir que las explicaciones que se dieron en el pasado acerca de la luz y el efecto que tenía la gravedad sobre esta dividió a los científicos en 2 teorías.

Una decía que la luz era un onda y por lo tanto la gravedad no surtía ningún efecto en ella, mientras que la segunda la consideraba como una partícula con masa por lo que podía ser atraída por un campo gravitacional.

Si consideramos la segunda teoría como verdadera, en un objeto de masa muy grande la velocidad escape sería superior a la de la luz y por esta razón no podría escapar del objeto haciendo que se viera totalmente oscuro. Esta hipótesis fue negada durante muchos años por varios científicos, quienes no compartían el tomar a la luz como una partícula con masa considerándolo absurdo.

Tras el desarrollo de Einstein con su teoría de la relatividad general se pudo dar una explicación mas precisa a este tipo de singularidades. Con esta teoría no fue necesario suponer que la luz tenía una masa en reposo ya que la gravedad se explicaba en base a la curvatura del espacio y la dilatación del tiempo. Esta hipótesis pudo explicarse demostrando matemáticamente que un objeto muy masivo deforma el espacio-tiempo haciendo que los rayos de luz emitidos por aquel objeto se desvíen tanto que no pueden escapar del horizonte de sucesos que son los rayos de luz que se encuentran rodeando aquella singularidad.

Este mismo efecto sucedería con el tiempo que se dilataría tanto que tendería a llegar a cero, impidiendo así que la luz no escape haciendo imposible observar los eventos más allá del horizonte de sucesos.

Por otra parte la investigación arrojó que la forma en que la materia es absorbida a través del hoyo negro comprueba la curvatura del espacio-tiempo que la relatividad predice en objetos de gran masa.

Los agujeros negros demuestran también los fenómenos de la dilatación del tiempo que es causado por el corrimiento al rojo, una consecuencia más producida por la deformación del espacio-tiempo a causa de la gravedad predicha por la relatividad general.

### **Conclusión:**

En nuestra investigación no encontramos ninguna fuente que utilizara las leyes de Newton de la mecánica clásica para explicar los fenómenos extraordinarios que se presentan en las vecindades de los hoyos negros o de cuerpos muy masivos.

Pudimos comprobar que los fenómenos causados por un agujero negro pueden ser explicados y demostrados matemáticamente por la relatividad general. Ha sido claro para nosotros en esta investigación que los hoyos negros han sido pruebas tangibles de la complejidad de los fenómenos que predice y explica la relatividad.

### **Bibliografía:**

Eric Chaisson (1990). Relativity Speaking. Relativity Black Holes and the fate of the universe. Canada. Ed. Penguin Books. Páginas 81 a 97

Cleveland John. Gamow George. (1974). Física. Madrid. Ed. Aguilar. Páginas 307 a 327

Einstein Albert. Infeld Leopold. (1982). La Física: Aventura del Pensamiento. Buenos Aires. Ed. Losada. Páginas 111 a 166

Einstein Albert (2005). Sobre la Teoría de la Relatividad Especial y General. Madrid. Ed. Alianza. Páginas 13 a 75

Gamow George. (1985). El Breviario del Señor Tompkins: en el País de las Maravillas la Investigación del Átomo. D.F. Ed. Fondo de Cultura Económica. Páginas 17 a 42

Hawkin Stephen. (1988). Historia del Tiempo. D.F. Ed. Crítica. Páginas 115 a 153