

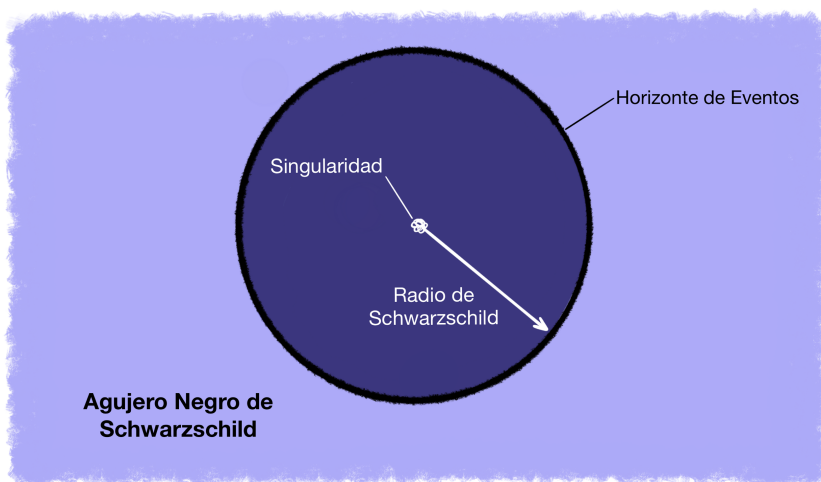
¿QUÉ ES UN AGUJERO NEGRO?

El primer paso para comenzar a comprender las propiedades de los agujeros negros es definirlos. Al contrario de lo que muchas personas piensan, un agujero negro no tiene mucho que ver con un hoyo o un hueco en un material físico. Desde la visión actual de la relatividad general, un agujero negro se define como *una región del espacio-tiempo en donde la gravedad es tan fuerte que nada, ni siquiera la luz, puede escapar*.

Debido a que la luz no puede salir de los agujeros negros, no es posible verlos directamente y por lo tanto estos deberían lucir completamente oscuros. Sin embargo, los agujeros si poseen otras características físicas medibles. Por ejemplo, al igual que cualquier otro objeto astrofísico, los agujeros negros poseen masa y por lo tanto generan gravedad. Ahora bien, es muy conocido que la gravedad en el entorno de estos objetos es extremadamente fuerte, y esto se debe a que la materia que los compone ha sido comprimida hasta el tamaño de un punto geométrico, el cual es denominado una *singularidad* (debido a que allí la densidad de materia es infinita y por ello dejan de ser válidas las ecuaciones de la física).

Alrededor de la singularidad existe una superficie esférica “virtual”, denominada el *horizonte de eventos*, que define el punto a partir del cual la luz no puede escapar a la influencia gravitacional y por lo tanto puede considerarse como la frontera del agujero negro. El radio del horizonte de eventos se denomina el *radio de Schwarzschild*¹ y tiene un tamaño que depende de la masa contenida en el agujero negro.

Estas dos características, singularidad y horizonte de eventos, son comunes a todos los agujeros negros. Sin embargo, más adelante describiremos otras clases de agujeros negros que poseen estructuras adicionales.



Estructura del agujero negro de Schwarzschild. El horizonte de eventos corresponde a la frontera de la región desde la cual nada, ni siquiera la luz, puede escapar. El radio de esta superficie esférica se conoce como el radio de Schwarzschild y depende del contenido de materia encerrada por el horizonte.

¹ El nombre se debe al físico Karl Schwarzschild (1873-1916) quien, en el año 1916, logró obtener la primera solución exacta de las ecuaciones de la relatividad general, la cual describe matemáticamente los agujeros negros esféricos y estáticos.

Radio de Schwarzschild

Matemáticamente, el radio de Schwarzschild está dado por la ecuación

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

donde G es la constante gravitacional de Newton, c es la velocidad de la luz en el vacío y M es la masa del agujero negro. Utilizando los valores conocidos para las constantes fundamentales G y c , un agujero negro con una masa de 10 masas solares tendrá un radio de Schwarzschild del orden de 30 km (tamaño aproximado de una ciudad como Bogotá). Por otro lado, un agujero negro con una masa de un millón de masas solares tendrá un radio de Schwarzschild de 3 millones de kilómetros, es decir aproximadamente 4 veces el radio del Sol.

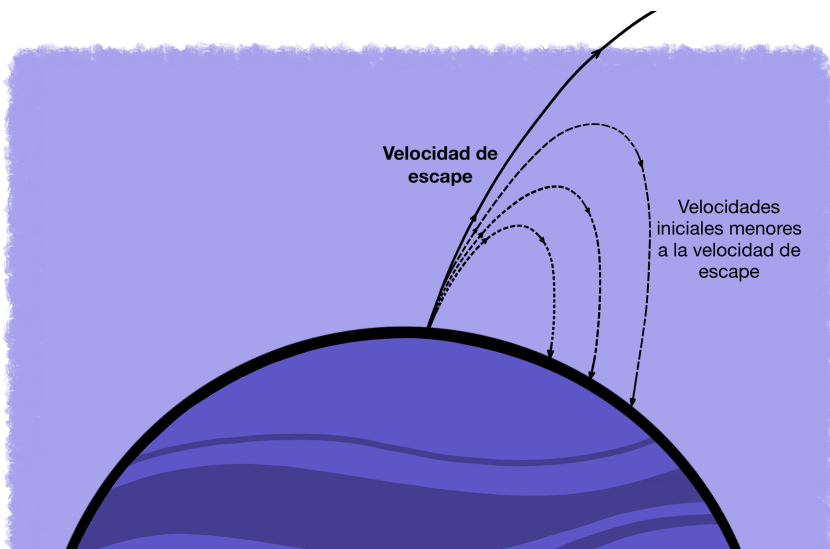
Estrellas Oscuras en la Gravedad Newtoniana

Aún cuando la teoría más adecuada para describir los agujeros negros es la relatividad general², su origen teórico se remonta a la ley de gravitación universal de Newton. En ésta, la gravedad se describe como una fuerza atractiva existente entre cualquier par de partículas en el Universo y que depende directamente del producto de las masas involucradas y del inverso del cuadrado de la distancia que las separa. Con su formulación matemática, Newton logra describir correctamente el campo gravitacional que produce

² La relatividad general es la teoría propuesta por Albert Einstein en el año 1916 que modela la gravedad como un efecto de la geometría del espacio-tiempo.

el Sol en su entorno, obteniendo un excelente modelo del Sistema Solar.

Uno de los resultados más interesantes de la teoría Newtoniana es la obtención de la *velocidad de escape*, que corresponde a la velocidad inicial que se le debe dar a una partícula de prueba para que, lanzada verticalmente hacia arriba desde la superficie de un cuerpo celeste, escape del campo gravitacional que éste produce. Claramente, es de esperar que el valor de la velocidad de escape dependa de la masa del cuerpo celeste al igual que de su radio (desde el cual que se lanza la partícula de prueba). Para el caso de la Tierra, la velocidad de escape es de alrededor de 11.2 km/s , mientras que, extendiendo estos cálculos al caso del Sol, se obtiene una velocidad de escape de alrededor de 617.5 km/s .



Partículas lanzadas desde la superficie de un cuerpo celeste con una velocidad inicial inferior a la velocidad de escape vuelven a la superficie debido a la atracción gravitacional. Si la velocidad inicial es igual o superior a la velocidad de escape, la partícula vence el campo gravitacional y se alejará para siempre.

Durante el siglo XVIII, algunos científicos comenzaron a considerar la idea de que en el Universo pudiesen existir cuerpos celestes con masas y/o tamaños adecuados para que la velocidad de escape fuese mucho mayor que la del Sol. De esta forma, en un artículo científico publicado en 1783, el astrónomo inglés John Michell propone una idea sorprendente: una estrella con una masa tan grande como para que la velocidad de escape desde su superficie sea mayor que la velocidad de la luz. Siguiendo el modelo corpuscular de Newton³, y por lo tanto aceptando que la luz se vería afectada por la gravedad, el razonamiento de Michell implica que la luz producida por una de estas estrellas no podría escapar de su superficie de tal forma que, desde el exterior, no pudiese ser observada. En otras palabras, la estrella luciría completamente negra para un observador lejano y por ello decidió llamar a estos extraños objetos *estrellas oscuras*. Michell llegó a proponer que muchos de estos objetos existirían en el Universo pero que los astrónomos no podrían obtener evidencia de ellos, a menos que estuviesen acompañados de estrellas luminosas que se vieran afectadas por su gravedad. Así, al medir el movimiento de la estrella compañera, los astrónomos podrían evidenciar la existencia de una estrella oscura.

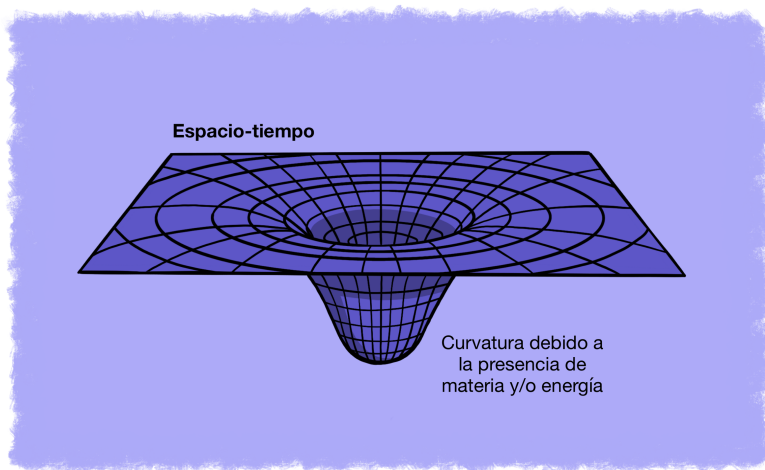
Otros científicos de la época también sugirieron la existencia de este tipo de objetos. Entre ellos se destaca el francés Pierre-Simon Laplace quien propuso, en su libro *Exposition du Système du Monde* (1795), la idea de objetos con las mismas propiedades y a los que denominó *cuerpos invisibles*. Sin embargo, al no obtenerse ninguna prueba observacional de la existencia de las estrellas oscuras, el tema se convirtió rápidamente en una curiosidad matemática

³ El modelo corpuscular considera que la luz está compuesta de pequeñas partículas que se mueven muy rápidamente y que pueden verse afectadas por interacciones como la gravedad.

y cayó en el olvido hasta el siglo XX, cuando reaparece con el surgimiento de la relatividad general.

Agujeros Negros en la Relatividad General

Iniciando el siglo XX, Albert Einstein propone la teoría general de la relatividad, en la que muestra que la gravedad puede entenderse como un efecto geométrico debido a la curvatura del espacio-tiempo. De acuerdo con esta teoría, la curvatura o deformación del espacio-tiempo depende de la densidad de masa presente en el Universo.

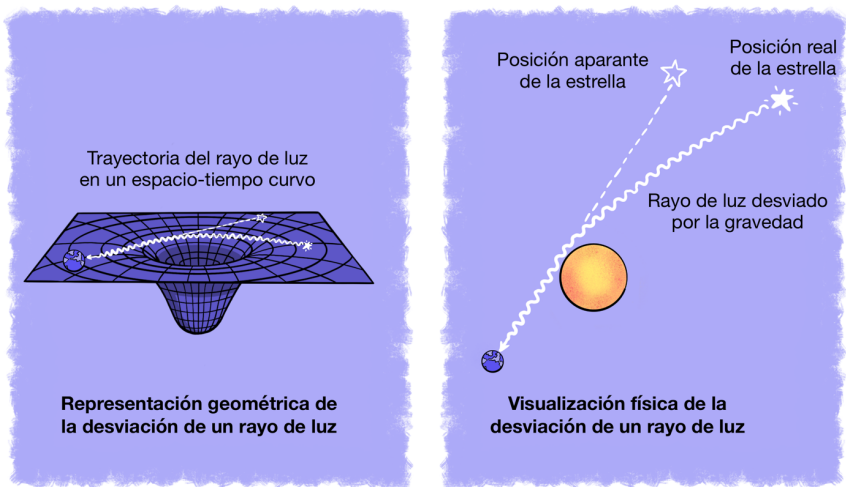


En la relatividad general el espacio-tiempo posee propiedades similares a las de una tela elástica. Así, la presencia de materia y/o energía deforma el espacio-tiempo. Por ejemplo, una distribución localizada como un planeta o una estrella producirá una deformación con la forma de pozo que se muestra en la ilustración.

En el año 1916, tan solo seis meses después de que Einstein publicara las ecuaciones de la relatividad general, el físico Karl Schwarzschild obtuvo la primera solución exacta. Ésta describe la geometría producida por un cuerpo esférico y estático (por ejemplo una estrella, en primera aproximación)

y con ella se pudo modelar la dinámica del Sistema Solar con un grado mayor de precisión que el de la gravedad Newtoniana⁴.

Un efecto de la visión geométrica de la relatividad general es que la presencia de cualquier masa en el Universo produce deformaciones que alteran la trayectoria que sigue cualquier partícula cercana, incluyendo no solo aquellas con masa, sino que también modifica el camino de los rayos de luz⁵.



A la izquierda se puede observar una visión geométrica de la curvatura del espacio-tiempo afectando la trayectoria de un rayo de luz. A la derecha se presenta la situación física correspondiente en donde la gravedad producida por un cuerpo celeste cambia la trayectoria de un rayo de luz proveniente de una estrella lejana. Nótese la posición real de la fuente en el momento de la emisión del rayo de luz y cómo un observador en la Tierra recibe el rayo de luz en una dirección que corresponderá a la posición aparente de la estrella.

⁴ Las desviaciones predichas por la relatividad general en el caso de la dinámica del Sistema Solar difieren de la teoría Newtoniana tan solo en una parte en un millón, pero estas diferencias ya eran medibles para el siglo XX.

⁵ En la visión moderna, la luz se puede considerar al mismo tiempo como una onda electromagnética y como un conjunto de partículas sin masa llamadas fotones. Aún cuando estas partículas no poseen masa, su movimiento si es afectado por la gravedad debido a que poseen energía.

Es interesante resaltar que Henry Cavendish, en 1784, y Johann Georg von Soldner, en 1804, ya habían propuesto que la trayectoria de los rayos de luz de estrellas lejanas podría ser afectada por la gravedad del Sol al pasar cerca de su superficie. Sus cálculos estaban basados en el modelo corpuscular de la luz y en la gravedad Newtoniana, pero nunca fueron medidos experimentalmente. Sin embargo, el valor de la desviación calculado por estos físicos era igual al que obtuvo Einstein, en 1911, utilizando solamente la teoría especial de la relatividad⁶. Sin embargo, luego de publicar las ecuaciones de la relatividad general en 1916, Einstein corrige su resultado para obtener que, un rayo de luz moviéndose con una trayectoria rasante a la superficie del Sol cambia la dirección de su movimiento con un ángulo de desviación de *1.75 segundos de arco*⁷.

El efecto relativista de la desviación de los rayos de luz fue comprobado durante el eclipse solar de 1919 por los astrónomos Arthur Eddington, Frank Watson Dyson y Andrew Crommelin. Las placas fotográficas obtenidas lograron mostrar que los rayos de luz emitidos por estrellas localizadas en la constelación de Taurus y que pasaron cerca de la superficie del Sol, se desviaron de sus trayectorias en línea recta en un ángulo igual al predicho por los cálculos de la relatividad general. Este primer éxito observacional catapultó a Einstein a la fama mundial y a partir de ese momento se convierte en la figura pública que representa el genio científico.

⁶ La teoría especial de la relatividad es el modelo propuesto por Einstein en 1905 que no incluía la noción geométrica de la gravedad. Por esta razón, el resultado obtenido para la desviación de la luz coincide con el obtenido con la gravedad Newtoniana, pero difiere del resultado de la relatividad general.

⁷ El resultado de *1.75 segundos de arco* para la desviación es el doble de lo predicho originalmente, utilizando solamente la relatividad especial.



Esta imagen corresponde a una de las fotografías obtenidas por los astrónomos Arthur Eddington, Frank Watson Dyson y Andrew Crommelin durante el eclipse solar del año 1919. Al medir cuidadosamente la posición aparente de estrellas de la constelación de Taurus durante el eclipse y comparándola con la posición real en otra época, se pudo concluir que existía un corrimiento o desviación exactamente igual al predicho por la teoría de Einstein.

[Crédito Imagen: ESO/Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl/F. W. Dyson, A. S. Eddington, & C. Davidson](#)

La solución de Schwarzschild contiene toda la información geométrica que produciría un cuerpo celeste esférico, incluyendo la posibilidad de que éste corresponda a un agujero negro. Sin embargo, el estudio de este tipo de objetos en el contexto de la relatividad se vio postergada debido a sucesos mundiales como la II guerra mundial. Solo hasta la década de 1960, físicos como John A. Wheeler de la Universidad de Princeton retoman la idea. De hecho, es Wheeler quien, durante una conferencia en el año 1967, acuña el término *agujeros negros* para nombrar estos objetos.

Aún cuando los astrónomos y físicos comenzaron a tomar seriamente la idea de los agujeros negros a partir de la década de 1970, se necesitaron muchos estudios y trabajos alrededor de su naturaleza, sus propiedades y la relación con su entorno para que finalmente se entendiera la forma de buscarlos en el Universo. El primer paso en estos desarrollos fue preguntarse *¿cómo pueden crearse los agujeros negros en la naturaleza?* y la respuesta resulto estar íntimamente ligada con la evolución estelar.