

ANATOMIA DE UN AGUJERO NEGRO

Los agujeros negros son extremadamente simples en términos de las propiedades físicas que los caracterizan. De acuerdo con el Teorema de no-pelo, mostrado por físicos como Werner Israel, Brandon Carter y David Robinson, los agujeros negros descritos por la Relatividad General solamente poseen masa, carga eléctrica y momento angular. Ya que a nivel astrofísico la carga eléctrica no es relevante, las soluciones matemáticas que describirían los agujeros negros reales corresponden al espacio-tiempo de Schwarzschild (agujero negro estático sin carga eléctrica) y el espacio-tiempo de Kerr (agujero negro rotante sin carga eléctrica). A continuación, estudiaremos la estructura física de estas dos soluciones desde el punto de vista geométrico de la relatividad general, asumiendo que no existe ningún otro objeto en el entorno. Aún cuando estos son modelos muy idealizados, permitirán identificar las características propias de los agujeros negros para luego, en un capítulo posterior, incorporar los efectos astrofísicos del entorno.

Agujeros Negros Estáticos

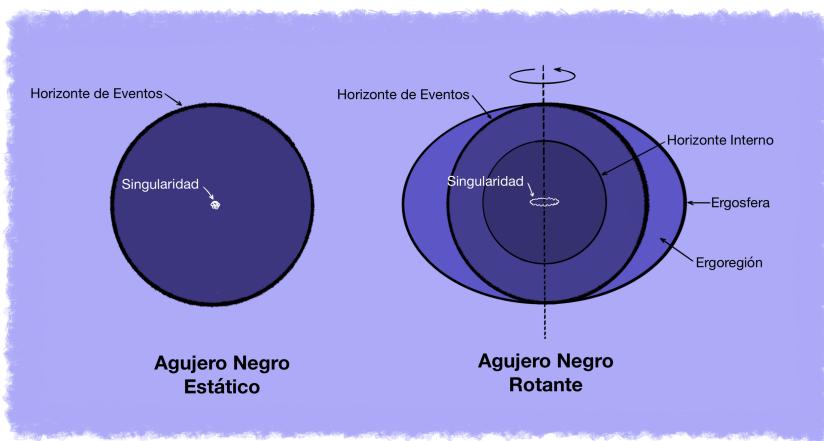
La estructura física del agujero negro de Schwarzschild solo comprende la *singularidad*, que corresponde al punto geométrico, con densidad infinita, donde se encuentra compactada toda la masa del objeto. Alrededor de ésta, se encuentra el *horizonte de eventos*, el cual corresponde a la superficie esférica que define la frontera de la región a partir de la cual ni siquiera un rayo de luz moviéndose radialmente puede escapar. El radio de esta superficie corresponde al radio de Schwarzschild que es directamente proporcional a la masa del agujero negro. Debe enfatizarse que el horizonte de eventos es un concepto definido matemáticamente y que allí no existe una superficie tangible real con la que pueda interactuar un observador que se encuentre allí.

Agujeros Negros Rotantes

Las observaciones astronómicas indican que la mayor parte de los objetos astrofísicos poseen momento angular. Por ejemplo, es bien conocido que las estrellas giran sobre sí mismas con periodos de rotación del orden de 20 o 30 días en promedio. Después del colapso gravitacional que sigue a su muerte, y debido a la conservación del momento angular, el remanente tendrá una velocidad angular mucho mayor. De hecho, se ha comprobado que las estrellas de neutrones giran a razón de miles de vueltas por segundo y por lo tanto es de esperar que, cuando el remanente sea un agujero negro, éste poseerá una velocidad angular mucho mayor. Por estas razones, la solución de Kerr debe ser la que mejor describe el comportamiento de los agujeros negros en el Universo.

La estructura física de un agujero negro rotante es más compleja que la de los estáticos. La primera diferencia radica en que, debido al efecto de la rotación, la singularidad no es un punto, sino que posee la estructura de un anillo. Allí estará concentrada la masa asociada al agujero negro, pero a diferencia de lo que sucede con la solución de Schwarzschild, en este caso la densidad no es infinita pero si extraordinariamente grande.

Alrededor de la singularidad se encuentran dos superficies con las propiedades del horizonte de eventos. Específicamente, la superficie más externa corresponde al punto de no-retorno y por ello se denomina el horizonte de eventos, mientras que la segunda superficie se denomina *horizonte interno* y, aún cuando comparte propiedades matemáticas con el horizonte de eventos, no puede ser medida ni estudiada por un observador externo.



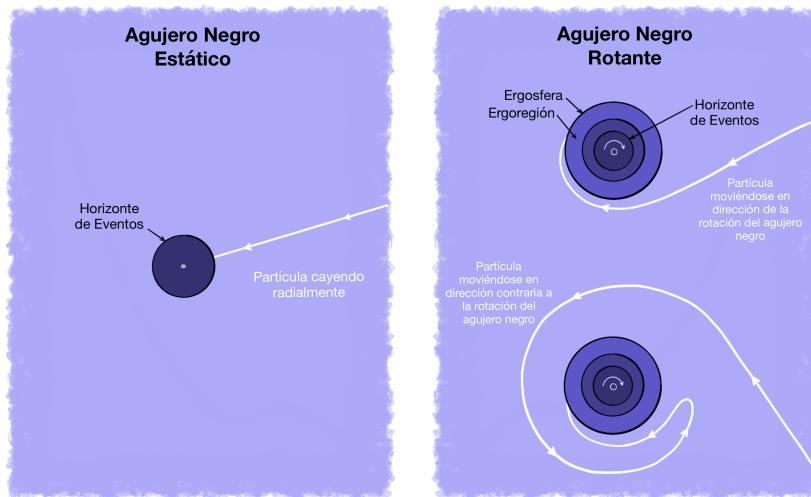
La estructura física del agujero negro de Schwarzschild solo incluye la singularidad puntual y alrededor de ella el horizonte de eventos. Por otra parte, el agujero negro de Kerr posee una estructura más compleja, incluyendo una singularidad en forma de anillo rodeada de dos horizontes. Alrededor del horizonte de eventos existe la ergoregión, en donde la rotación del agujero negro arrastra cualquier partícula que ingrese, incluso los fotones.

Los dos horizontes son similares en aspectos matemáticos como que algunas cantidades geométricas evaluadas en estas superficies pueden tomar valores infinitos al utilizar ciertos sistemas de coordenadas, o en que los dos corresponden a superficies sobre las cuales se mueven radialmente los rayos de luz. Sin embargo, desde el punto de vista físico, un observador externo solo percibe la existencia del horizonte de eventos, mientras que el horizonte interno está y estará oculto por siempre.

Los agujeros negros rotantes poseen, alrededor del horizonte de eventos, una superficie adicional denominada la *ergosfera*. Para comprender el significado de esta superficie es necesario profundizar un poco en la dinámica de las partículas alrededor de estos agujeros negros. Cuando una partícula se deja caer radialmente hacia un agujero negro estático, su trayectoria será simplemente una línea recta. Sin embargo, cuando una partícula se deja caer radialmente hacia un agujero negro de Kerr, la rotación del agujero negro “arrastra” la partícula, haciendo que su trayectoria no sea una recta sino una espiral. A este efecto se le denomina “arrastre de marcos iniciales” debido a que no solo afecta a las partículas cayendo radialmente, sino que en realidad sus consecuencias se manifiestan en cualquier sistema de referencia inercial en el entorno del agujero negro. Esto es, el agujero negro literalmente arrastra con su rotación todo lo que lo rodea. De hecho, al acercarse a uno de estos objetos existe una distancia a partir de la cual el espacio-tiempo es completamente arrastrado, de tal forma que todas las partículas, incluso los fotones, se ven obligadas a rotar junto con el agujero sin poder oponerse.

La superficie a partir de la cual incluso la luz se ve completamente arrastrada por la rotación del agujero negro

se denomina la *ergosfera* y la región ubicada entre esta superficie y el horizonte de eventos se llama la *ergoregión*²⁸.



A la izquierda se puede observar una partícula cayendo radialmente hacia un agujero negro de Schwarzschild y claramente su trayectoria es una línea recta. Al lado derecho se observa como las partículas que caen hacia un agujero negro rotante adquieren momento angular debido al efecto del "arrastre de sistemas inerciales". Por esta razón, cualquier partícula, con o sin masa, se ve obligada a moverse en la misma dirección de la rotación del agujero negro al llegar a la ergosfera.

La ergosfera no es completamente esférica, sino que tiene la forma de un esferoide que coincide con el horizonte de eventos en los polos y presenta un abultamiento hacia el plano ecuatorial. También es importante notar que, aunque dentro de la ergoregión el arrastre es tan fuerte que todo rota junto con el agujero, las partículas que se encuentran allí

²⁸ Los adjetivos ergosfera y ergoregión provienen de la palabra griega “*ergon*” que significa “trabajo” y su uso se debe a que desde el punto de vista teórico es posible utilizar el efecto de arrastre para realizar trabajo, y por lo tanto extraer energía a partir del agujero negro (ver la descripción del proceso de Penrose mas adelante).

pueden salir de esta región si poseen la velocidad radial adecuada.

Para lograr medir el efecto del arrastre de sistemas inerciales, se pueden utilizar dos satélites en órbita alrededor del agujero negro moviéndose en direcciones opuestas. Claramente debe existir una diferencia entre el movimiento del satélite que se mueve en la dirección de la rotación del agujero negro y el movimiento del satélite que se mueve en dirección opuesta. La diferencia entre los períodos de movimiento no solamente comprobaría el arrastre de sistemas inerciales, sino que con una medición precisa se podría estimar la velocidad de rotación del agujero negro.

Aún cuando actualmente este tipo de observaciones no se ha realizado en el entorno de un agujero negro, el efecto del arrastre de sistemas inerciales sí fue comprobado experimentalmente en el límite de campo débil por la misión espacial *Gravity Probe B* cuando, en el año 2011, logró medir el efecto de la rotación de la Tierra en la dinámica de giróscopos ubicados en satélites artificiales.

Singularidades

Una de las propiedades comunes a todos los agujeros negros en la relatividad general es la existencia de una singularidad en donde se concentra toda la masa del objeto. Tal y como se comentó en un capítulo anterior, el término singularidad se utiliza debido a que las ecuaciones de la física divergen en esta estructura. En la relatividad general, esto ocurre porque cantidades físicas como la densidad de materia o porque aspectos geométricos como la curvatura, toman valores infinitos al ser evaluadas allí.

Ahora bien, nuestro conocimiento de la naturaleza y del Universo se basa en la capacidad de predicción que tienen

las ecuaciones de la física, pero al estar en presencia de una singularidad, esta capacidad desaparece. Esta es la razón por la cual muchos científicos se han preocupado por comprender la naturaleza de las singularidades, ya que ellas no aparecen solamente en el contexto de los agujeros negros, sino también en escenarios extremos como el Big Bang²⁹. Afortunadamente, los resultados de muchos estudios han mostrado que, al parecer, las singularidades siempre aparecen cubiertas por un horizonte de eventos o de una estructura similar que protege a los observadores externos de los problemas que ellas inducen en las leyes de la física³⁰.

Este concepto de singularidad permite comprender el porque la palabra “agujero” no representa completamente el concepto del agujero negro. Cuando se habla de un “agujero” es usual imaginarse que, al agregarle materia, éste podría llegar a llenarse. Sin embargo, esto nunca ocurre en el caso de los agujeros negros porque, sin importar la cantidad de materia que se le agregue, este nunca se “llenará” sino que, en lugar de ello, la masa o energía adicionadas aumentarán su tamaño. Ahora bien, es importante resaltar que este aumento no ocurre porque la singularidad cambie de forma o tamaño (ésta seguirá siendo un punto en el caso de Schwarzschild o un anillo en el caso de Kerr), sino porque el

²⁹ Las singularidades no son exclusivas de la relatividad general. Por ejemplo, en la electrodinámica también existen singularidades debido al carácter puntual de las cargas eléctricas, en las cuales la densidad de carga tomaría un valor infinito. Sin embargo, los problemas inducidos por este tipo de singularidades pueden corregirse al introducir algunos métodos matemáticos apropiados, mientras que en la relatividad general no pueden evitarse.

³⁰ Tan importante es este aspecto que algunos físicos han propuesto la existencia de una “ley” universal que prohibiría la existencia de singularidades desnudas, es decir que la naturaleza exigiría que toda singularidad debe ir cubierta por un horizonte que prevenga del caos que ella induciría. Esta propuesta se conoce como la *Hipótesis del Censor Cósmico*.

radio del horizonte de eventos crecerá porque su valor es proporcional a la masa.

La Experiencia de Observadores localizados cerca de un Agujero Negro

Es común realizar preguntas como ¿qué se siente estar cerca de un agujero negro? o también ¿qué se observa cuando se cae a un agujero negro? A continuación, abordaremos esta clase de interrogantes.

Inicialmente es importante aclarar que la fuerza de gravedad que siente un observador a una cierta distancia de un agujero negro es la misma fuerza que sentiría al estar a la misma distancia de cualquier otro objeto celeste (estrella, planeta, etc.) con la misma masa. Es decir, el agujero negro no ejerce una clase de fuerza diferente a la gravedad que ejercería cualquier otro objeto astrofísico con la misma masa. Por esta razón, no es correcto afirmar que un agujero negro se “come” todo lo que está a su alrededor y que podría llegar a absorber todo el Universo. Esto sería tanto como afirmar que una estrella o un planeta pudiese llegar a hacer lo mismo.

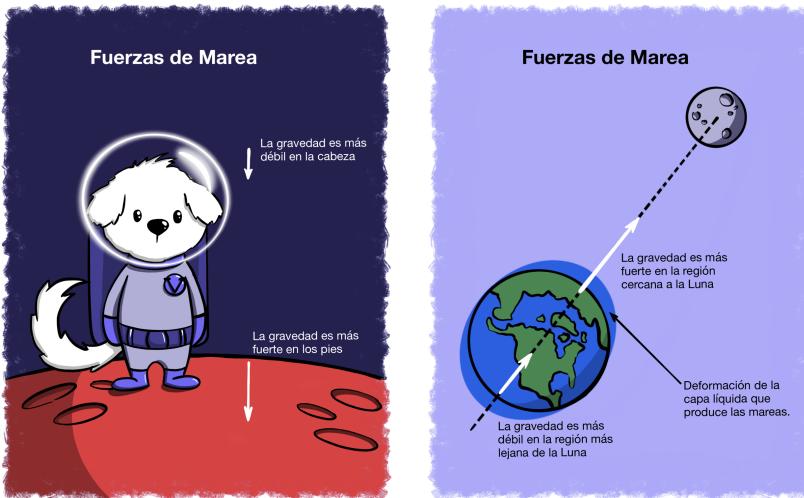
Sin embargo, cabe aclarar que, en el caso de una estrella o un planeta, cualquier observador solo puede acercarse hasta la superficie del objeto, mientras que, en el caso de un agujero negro, el observador puede llegar tan cerca como desee del horizonte de eventos e incluso puede ingresar a través de éste para dirigirse hacia la singularidad. Por esta razón, la magnitud de la fuerza de gravedad que uno de estos observadores medirá en las regiones cercanas del horizonte serán mucho mayores que las que puede llegar a medir en la superficie de cualquier otro objeto astrofísico. De hecho, esta característica es la que confiere las propiedades interesantes a los agujeros negros, ya que exactamente en el horizonte de

eventos, la gravedad posee un valor tan grande que no deja escapar los rayos de luz

Observador en Caída Libre hacia un Agujero Negro

Cuando se analiza cualquier situación física en la relatividad general debe tenerse en cuenta quién, de todos los posibles observadores, describe el proceso.

Por ejemplo, un observador que cae libremente hacia el agujero negro no percibe ninguna fuerza, ni siquiera la gravedad. Por ello, los observadores en caída libre no registrarán nada inusual a lo largo de su trayectoria e incluso cruzan el horizonte de eventos sin percibir nada especial.



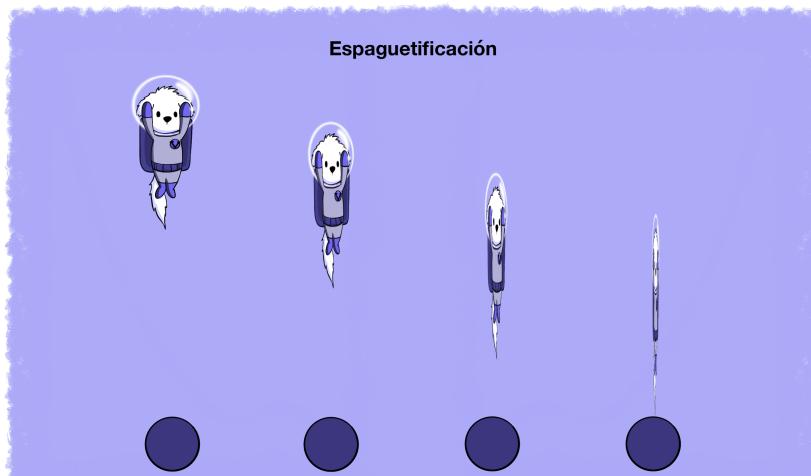
Debido a que la fuerza de gravedad decrece con el cuadrado de la distancia, la fuerza que siente un observador es mayor en su cabeza y menor en sus pies. A esta diferencia en la magnitud de la gravedad en un cuerpo extenso se le conoce como "fuerzas de marea" debido a que es la responsable de las mareas en los océanos de la Tierra.

Sin embargo, el régimen fuerte de la gravedad hace que se haga notable una característica que modifica un poco la

situación. Como es conocido, la fuerza de gravedad disminuye con el cuadrado de la distancia. Así, incluso en el débil campo gravitacional de la Tierra, una persona de pie en la superficie del planeta sentirá una fuerza gravitacional un poco mayor en los pies que en la cabeza. De la misma forma, la fuerza gravitacional que la ejerce Luna es diferente a un lado y a otro de la Tierra, razón por la cual la masa de agua de los océanos se deforma mientras el planeta rota, causando las mareas. Por esta razón, a estas diferencias en la fuerza gravitacional que actúa sobre un cuerpo extenso se les denomina *fuerzas de marea*.

Volviendo al caso de los agujeros negros, los cambios en la magnitud de la fuerza gravitacional cerca del horizonte de eventos en función de la distancia pueden ser dramáticos y por ello, las fuerzas de marea resultantes pueden producir efectos enormes sobre los objetos que se acerquen. Por ejemplo, utilizando las ecuaciones de la física, es posible calcular la distancia denominada *límite de disruptión*, a la cual un objeto particular es destruido por la acción de las fuerzas de marea de un agujero negro. En el caso de agujeros negros supermasivos, para los cuales el radio de Schwarzschild puede ser tan grande como las órbitas de los planetas en el Sistema Solar, las fuerzas de marea no son apreciables para un astronauta o para una nave espacial debido a su pequeño tamaño. Por esta razón, un astronauta podría cruzar el horizonte de eventos de un agujero supermasivo en su nave espacial sin siquiera notar estas fuerzas de marea. Sin embargo, si un objeto astrofísico con un tamaño considerable, como por ejemplo una estrella, se acerca a uno de estos agujeros, las fuerzas de marea actuarán produciendo deformaciones y, eventualmente, haciendo que parte de la masa del objeto se desprenda y caiga hacia el agujero negro. Incluso, si la estrella se acerca demasiado al horizonte de eventos, cruzando el límite de disruptión, sería destruida por completo.

Por otra parte, en el caso de los agujeros negros estelares, el radio de Schwarzschild tiene un tamaño del orden de los kilómetros y por lo tanto, incluso un astronauta puede sentir enormes fuerzas de marea antes de cruzar el horizonte. Suponiendo que un astronauta se encuentre en caída libre con sus pies en dirección de un agujero negro de unas pocas masas solares, las fuerzas de marea aumentan mientras él se acerca al horizonte de eventos. Esto implica que sus pies sentirán una fuerza gravitacional mayor que su cabeza, lo que a su vez producirá una deformación (estiramiento del cuerpo del astronauta) y por lo tanto, aumentando un poco más el efecto de las fuerzas de marea. Si el astronauta estuviese hecho de un material maleable o elástico, su cuerpo se estiraría más y más hasta que se convertiría en una cadena de partículas infinitamente larga. A este efecto de estiramiento y deformación por fuerzas de marea se le suele denominar *espaguetificación*. Sin embargo, el cuerpo humano y las naves espaciales reales están hechos de



Las fuerzas de marea producen el estiramiento de un astronauta que se acerca al horizonte de eventos de un agujero negro. Si el cuerpo del astronauta estuviese hecho de un material elástico, éste se deformaría hasta convertirse en una cadena de partículas. A este efecto se le denomina “espaguetificación”.

materiales rígidos, que no permiten deformaciones extremas y como resultado, las fuerzas de marea despedazarán el cuerpo del astronauta en porciones cada vez más pequeñas que finalmente cruzarán el horizonte de eventos dirigiéndose inevitablemente hacia la singularidad.

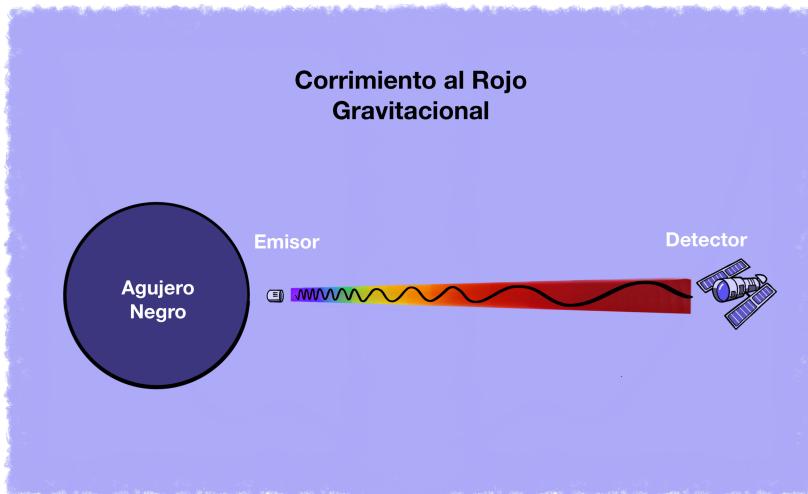
Dilatación del Tiempo

La dilatación del tiempo es uno de los resultados de la relatividad que más ha interesado a los científicos desde su formulación. En el caso gravitacional, este efecto tiene como resultado que un observador lejano percibe que los movimientos de alguien cercano a la fuente de gravedad lucen más lentos, mientras que el observador cercano ve que las acciones de alguien lejano suceden rápidamente. Los cálculos teóricos muestran que, bajo la influencia de la gravedad extrema de un agujero negro, el efecto de dilatación temporal es infinito cuando uno de los observadores está ubicado en el horizonte de eventos. Es decir que, para un observador lejano, todo lo que sucede en el horizonte de eventos parece “congelado” en el tiempo³¹.

Con esta información es posible comprender como lucirá un astronauta en caída libre hacia el agujero negro desde el punto de vista de un observador lejano. Suponiendo, por simplicidad, que el agujero negro no posee rotación, el observador lejano percibirá que los movimientos y acciones del astronauta irán viéndose cada vez más y más lentos mientras se acerca al horizonte. Incluso el movimiento de caída del astronauta no presentará aceleración, sino que parecerá frenar hasta que, al llegar exactamente al horizonte

³¹ Este resultado de la dilatación temporal fue conocido desde el inicio del estudio de los agujeros negros. Por ello, en un comienzo se quiso llamar a estos objetos “estrellas congeladas” porque, para observadores lejanos, el horizonte de eventos luciría completamente estático.

de eventos, lucirá completamente “congelado”. Ahora bien, debe notarse que el observador externo no verá al astronauta ubicado en el horizonte para siempre, sino que mientras va cayendo su imagen se irá desvaneciendo y eventualmente desaparecerá. Esto se debe a que, superpuesto con el efecto de dilatación temporal, se presenta el efecto de corrimiento al rojo gravitacional.



Un rayo de luz emitido cerca del horizonte de eventos es afectado por el campo gravitacional. Como consecuencia la energía de la radiación disminuye y por lo tanto su frecuencia se ve desplazada al extremo menos energético del espectro. Este efecto se denomina “corrimiento al rojo gravitacional”.

Corrimiento al Rojo Gravitacional

De forma adicional al efecto de la dilatación del tiempo, la percepción de un observador lejano estará afectada por el corrimiento al rojo gravitacional. Este efecto corresponde al desplazamiento en la frecuencia que sufren todos los rayos de luz emitidos desde las regiones cercanas al horizonte de eventos. Debido a que la radiación electromagnética se ve afectada por la gravedad, cuando un rayo de luz se mueve

radialmente alejándose del entorno del agujero negro su energía disminuye y con ello su frecuencia se moverá hacia la región menos energética del espectro, es decir, hacia el color rojo o las ondas de radio.

De esta forma, cuando un observador lejano ve a un astronauta cayendo hacia el agujero negro, la imagen que recibe irá cambiando de frecuencia, pasando de los colores más azules del óptico hacia el rojo y desapareciendo de la visión humana al llegar a las frecuencias del infrarrojo y las ondas de radio. La relatividad general asegura que cuando la fuente de luz llega exactamente al horizonte de eventos, el observador externo percibirá un corrimiento total hacia las frecuencias menos energéticas. En este punto, la fuente de luz desaparecerá completamente para cualquier detector de ondas electromagnéticas ubicado en la parte externa.

Dentro del Horizonte de Eventos

Para finalizar este capítulo es necesario comentar una situación interesante con respecto a la naturaleza misma del espacio-tiempo en la región ubicada dentro del horizonte de eventos. Cuando se estudia con detalle lo que sucede con las coordenadas en la solución de Schwarzschild, los cálculos matemáticos indican que dentro del agujero negro las coordenadas espaciales y temporales se distorsionan tanto, que ¡la distancia desde el horizonte de eventos hasta la singularidad no es una longitud espacial sino un intervalo de tiempo! Esto ocurre porque la relatividad general permite que las coordenadas espaciales y temporales se mezclen entre sí debido a la influencia de la gravedad. Debido a que dentro del horizonte de eventos el campo gravitacional es tan fuerte, las coordenadas espaciotemporales intercambian su naturaleza. Con ello se puede explicar el por qué un objeto que atraviesa el horizonte no tiene más opción que seguir su

camino hacia la singularidad. Al igual que el futuro es ineludible, la destrucción completa en el centro de fuerzas es inevitable.

Este resultado matemático ha sido controvertido por muchos científicos ya que se ha demostrado que, con un simple cambio de coordenadas, este tipo de interpretación deja de tener sentido. Sin embargo, la idea de un intercambio de las coordenadas temporal y espaciales dentro del agujero negro ha despertado el interés del público en general desde que fue publicado y, muy seguramente debido a ese hecho, es que los agujeros negros siempre han sido relacionados con temas propios de la ciencia ficción como el viaje en el tiempo o la posibilidad de acceder a nuevas dimensiones del espacio y/o del tiempo. Ahora bien, debido a que en este trabajo solo presentaremos los hechos descritos por la ciencia, dejaremos estas especulaciones de lado y continuaremos nuestro camino discutiendo la forma de detectar agujeros negros en el Universo.