

Agujeros Negros:

Hay una fuerza con la que estamos todos familiarizados que es la gravedad. Si se tira una piedra hacia arriba, vuelve a caer. Lo que es asombroso es que esa misma fuerza gobierna no solo la subida y la caída de la piedra, sino también los movimientos de los astros en cualquier rincón del universo. La altura máxima que alcanzará será tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad inicial que le hayamos dado al arrojarla. Existe, de hecho, una velocidad, conocida como *velocidad de escape* (la cual se obtiene igualando la Energía Cinética con la Energía Potencial Gravitatoria), tal que si la piedra se lanzara hacia arriba con una velocidad superior a ella, sería capaz de escapar de la atracción gravitatoria de la Tierra. Esta velocidad es aproximadamente de 40320 Km/h. Si en lugar de lanzar la piedra desde la superficie terrestre, pudiéramos hacerlo desde el Sol, la velocidad necesaria para que se escapara de la atracción gravitatoria del astro rey sería bastante mayor, unos 620 Km/s. El valor de la velocidad de escape, v_e se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Las otras variables de la expresión son la masa M del objeto que ejerce la atracción gravitatoria, su radio, R y la constante gravitatoria G (cuyo valor es de $6,67 \cdot \frac{10^{-11}m^3}{kg.s^2}$).

Es decir, si la Tierra tuviera la misma masa ($6 \cdot 10^{24}Kg$), pero su radio fuera dos veces menor (3185 km en lugar de 6370 km), la velocidad requerida para escapar de su “abrazo” sería mayor (alrededor de 16 km/s).

Imaginemos ahora un escenario en el que la Tierra siguiera compactándose y, con la misma masa, fuera reduciendo su radio cada vez más, hasta alcanzar un tamaño de 0,9cm. Haciendo cuentas se puede constatar que, para vencer el campo gravitatorio ejercido por una masa como la de la Tierra concentrada en tan pequeño volumen, la velocidad de escape sería de unos 300000 Km/s ¡La velocidad de la luz en el vacío! Ahora bien, dado que, según la teoría de la relatividad especial, dicha velocidad es la máxima que se puede alcanzar, nada, ni siquiera la luz, podría escapar de un objeto así. La Tierra se habría convertido en lo que conocemos como *agujero negro*.

De la ecuación anterior se desprende que el tamaño del agujero negro, el radio, depende de la masa. Un agujero negro con la masa de la Tierra tendría, como hemos visto, un radio de 0,9 cm, si su masa fuera la del Sol, tendría 3 Km de radio. La fuente SgrA* (léase Sagitario A estrella), un objeto emisor situado en el centro de la Vía Láctea, en la dirección del brazo de Sagitario, parece ser un enorme agujero negro con una masa equivalente a 4 millones de soles y un radio inferior a una unidad astronómica (UA, 150 millones de kilómetros, la distancia media entre la Tierra y el

Sol). Finalmente, los agujeros negros supermasivos que se cree que residen en el corazón central de la mayor parte de las galaxias de forma espiral o elíptica (el SgrA* sería el de la Vía Láctea), y que pueden alcanzar una masa de unos mil millones de veces la del Sol, tendrían un tamaño similar al de nuestro sistema solar.

La geometría de un agujero negro:

Consideremos un agujero negro y materia orbitando en entorno a él. Conforme esta se va acercando al agujero negro aumenta la atracción gravitatoria, y la materia necesita una velocidad mayor para mantenerse en un orbita estable sin ser atrapada por el objeto central. Llegará un momento en que la materia necesitara viajar a la velocidad de la luz para no ser engullida por el agujero negro. Esta sería la última orbita estable del material atraído por el agujero negro, que dibujaría una especie de “última frontera”, conocida como horizonte de sucesos. Cualquier partícula que superara esa frontera seria atrapada.

El horizonte de sucesos puede pensarse desde la perspectiva no de un objeto que cae hacia el agujero negro sino desde la de otro que intenta salir de él; en este caso, la frontera corresponde a la luz que, procedente de la estrella, no consigue partir al infinito y permanece allí detenida. Existen:

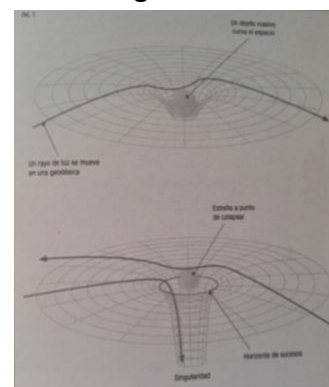
Agujero negro estático:

Para este caso esta frontera se conoce como radio de Schwarzschild o radio gravitatorio y se expresa como:

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

Donde M, es la masa del objeto y c, la velocidad de la luz. Con esta expresión que es válida para todo agujero negro estático y de simetría esférica, se calculan los radios de los agujeros negros imaginarios con masas equivalentes a la Tierra y el Sol que hemos visto antes.

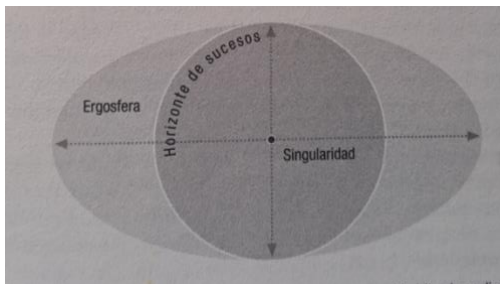
Cuando la masa o la luz atraviesan el horizonte de sucesos hacia la región central del agujero negro, la singularidad (figura 1). Toda la masa del objeto original se concentra en esa región. Podemos imaginar el agujero negro como una especie de embudo, a través del cual la materia se precipita hacia su interior. La curvatura del agujero negro se iría incrementando hasta el extremo de que en su región más interna dicha curvatura se haría infinita. Allí todo se hace matemáticamente infinito: no solo la curvatura del espacio-tiempo, sino que la densidad de la materia, así como en consecuencia, la gravedad.



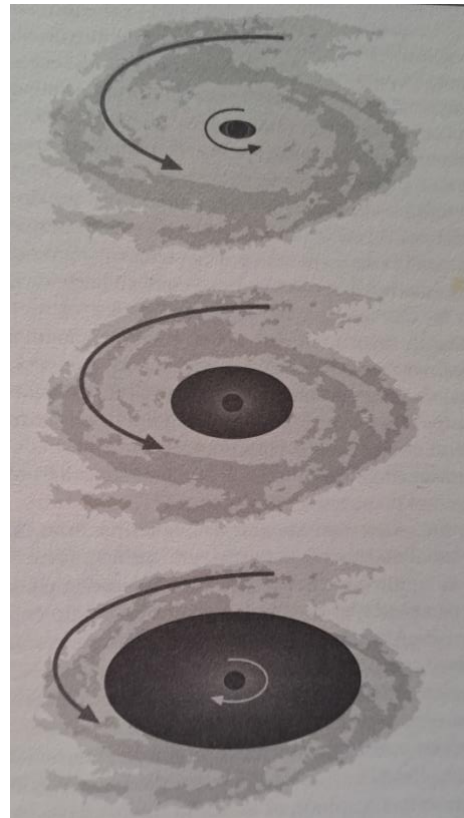
Agujero negro en rotación:

En el caso de un agujero negro en rotación: llamado agujero negro de Kerr, su estructura tendría la forma de elipsoide en lugar de una esfera debido al achatamiento producido por la rotación, tal y como sucede con la Tierra.

En ese sentido, el horizonte de sucesos sería menor que para un agujero negro estático. El espacio extra que presenta el horizonte de sucesos en forma de elipsoide con respecto al esférico se conoce técnicamente como ergosfera del agujero negro (figura 2). La importancia de la ergosfera estriba en que, debido a que se encuentra fuera del horizonte de sucesos, la materia podría escaparse de la atracción gravitatoria del agujero negro. Es decir, un objeto podría ganar energía cinética al entrar en el campo gravitatorio del agujero negro en rotación y ser capaz de escapar llevándose consigo parte de la energía de este. La singularidad de estos agujeros negros serían anillos y no punto como en los agujeros negros estáticos.

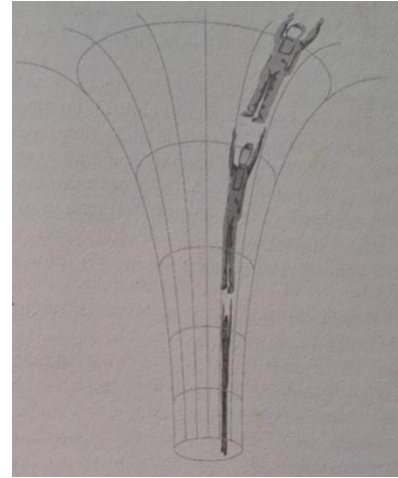


La rotación de un agujero negro también modifica en "valor" a la última órbita estable del material que está cayendo hacia él, de modo que se consiguen diferentes valores según la orientación relativa de la rotación del agujero negro y de la materia que cae. Cuando ambos rotan en la misma dirección, la materia puede aproximarse hasta distancias de un radio de Schwarzschild o R_{SCH} (radio mayor de la elipsoide), mientras que si lo hacen en sentido contrario, la última órbita estable se situaría a una distancia aproximada de $10 R_{SCH}$ (figura 3). De este modo, si se puede determinar experimentalmente el tamaño físico de la región emisora comparándola con su radio gravitatorio, puede determinarse el sentido de rotación del agujero negro.



¿Qué ocurre si te caes en un agujero negro?

Cualquier objeto cuyo destino fuera caer dentro de un agujero negro acabaría aplastado en la singularidad hasta alcanzar una densidad infinita. Antes que eso, sin embargo, tendría la dudosa suerte de ser víctima de las fuerzas de mareas, resultado de la diferente atracción gravitatoria experimentada por distantes partes del objeto conforme se aproxima al horizonte de sucesos. Las consecuencias de este proceso tendrían sobre el objeto han sido bautizadas por los astrofísicos con un término muy descriptivo: espaguetización. De hecho, la transformación inducida por las fuerzas de mareas es doble: por un lado, el objeto tendería a alargarse en la dirección radial, es decir, hacia el agujero negro, por la diferente atracción gravitatoria mencionada, por otro tendería a afilarse en la dirección transversal hasta un tamaño nulo (figura 3). Como la curvatura es enorme cerca del horizonte, el objeto puede hacerse tremendamente largo sin sobresalir del horizonte de sucesos.



Una característica muy importante de los agujeros negros, tal como predice la Relatividad General, es su forma que es independiente de la manera en que se formaron. En todo su proceso de creación solo se conserva información sobre sus propiedades: la masa, el momento angular (en caso que se encuentre en rotación) y la carga eléctrica (si tiene). Esta propiedad propuesta por John Wheeler (también introdujo el término agujero negro) se conoce como Teorema de la ausencia de pelo del agujero negro (en realidad, deberíamos decir que tiene “tres pelos”: masa, momento angular y carga, pero si tenía una melena, ¡se ha perdido toda información sobre ella!).

Como consecuencia de los principios relativistas la presencia de masa cambia en el transcurso del tiempo. Para un observador que está muy cerca de la superficie de un objeto muy masivo, donde la gravedad es más intensa, el tiempo transcurre más lentamente que para un observador muy alejado del objeto. Llegará un momento, muy cerca del agujero negro, donde la materia que cae hacia él alcanzará casi la velocidad de la luz y el tiempo se ralentizará hasta detenerse. Aunque para un observador alejado del agujero negro ha transcurrido un tiempo infinito (la materia quedaría para siempre suspendida en el horizonte de sucesos), para la materia que cae solo ha transcurrido un tiempo corto (atravesaría el horizonte de sucesos y descendería hacia la singularidad central).

