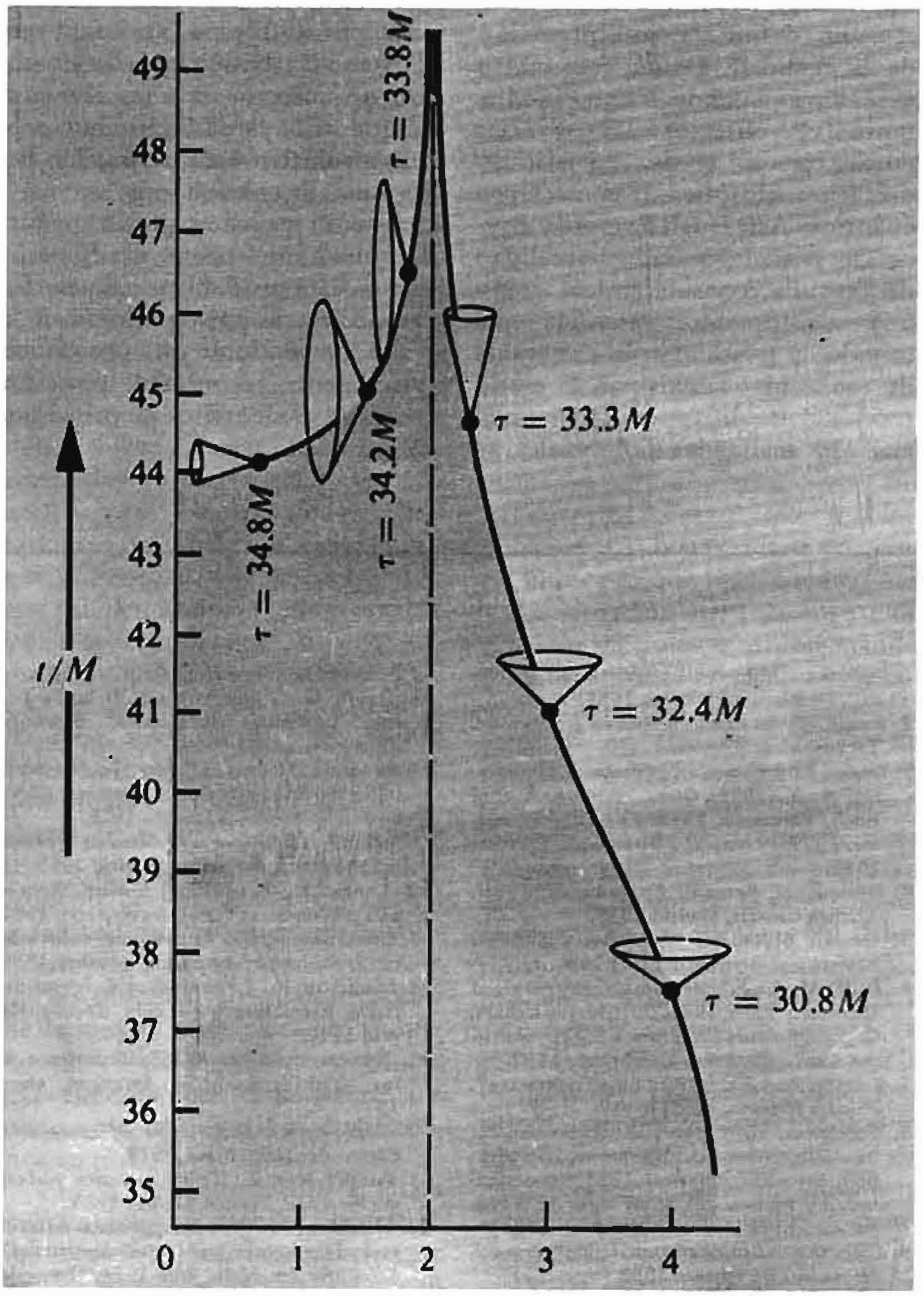
LOS HOYOS NEGROS CUERPOS CELESTES OCULTOS

Nora Eva Bretón Báez*



Representación gráfica del colapso de una estrella con un radio inicial mayor que 2M (en unidades que G = c = 1). Los conos de la figura son los llamados "conos de luz". La dirección del movimiento de una partícula debe encontrarse siempre dentro del cono (o sobre él, si su velocidad es la de la luz). Nótese que para $r < 2M$, los conos están dirigidos hacia el interior, por lo que una partícula no puede escapar.

En los años recientes ha estado de moda el hablar de los hoyos negros, bolas negras en el espacio que "tragan" cuanto se ponga a su alcance. Pero ¿de dónde salen estos hoyos?, ¿en dónde y cómo pueden observarse?, ¿cuántos hoyos negros hay?, ¿qué son?

Un hoyo negro puede ser el resultado de una estrella que ha colapsado; esto es, en la "vida" de una estrella llega el momento en que se agota el combustible nuclear y la estrella lentamente empieza a contraerse, presionando y comprimiendo todo el material que la forma. Cuando ya no existe la presión hacia afuera producida por las reacciones nucleares en el interior de la estrella, la estrella pierde su equilibrio y su propia atracción gravitacional hace que toda la estrella se precipite hacia "adentro" de ella misma, llegando a ocupar toda esta masa un volumen muy reducido, con una densidad muy grande, creándose así un objeto con un campo gravitacional enorme. Si este proceso continúa, la estrella cae dentro de lo que se denomina su horizonte, su superficie se vuelve tal que nada puede salir de ella: ninguna información de lo que pasa dentro puede llegar a nosotros; toda la materia que cruza esa superficie jamás puede salir de ella. Ni la luz puede escapar a este grandísimo campo gravitacional, de aquí el nombre de hoyo negro.

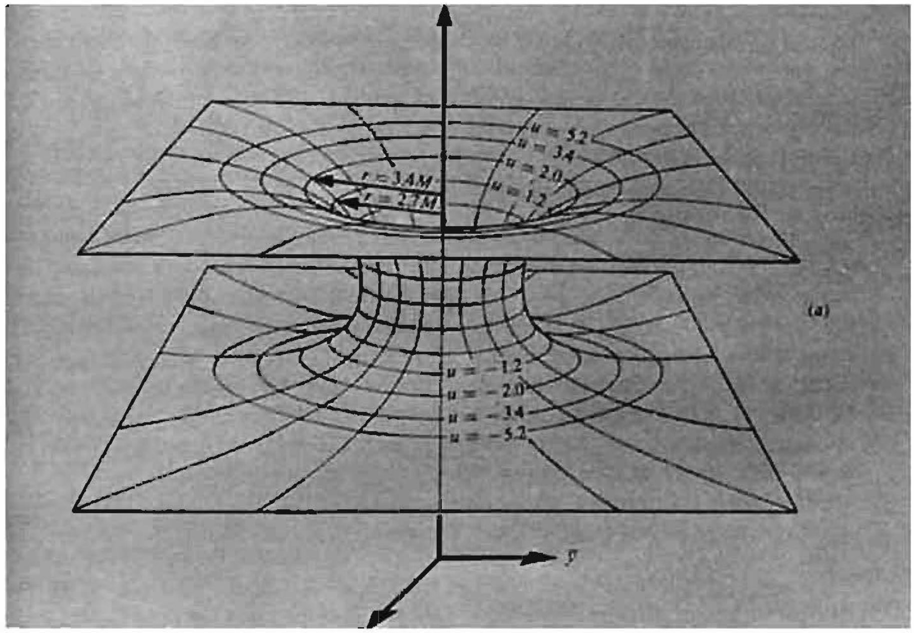
Sin embargo, es posible investigar lo que ocurre en un hoyo

* Departamento de Física del Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del IPN. Apdo. post. 14-740, México, D.F., 07000.

elementos núm. 9, año 2, vol. 2. Impreso en México.

negro analizando, por medio de ecuaciones, cómo es la geometría del espaciotiempo que lo rodea. Como parte de la mecánica clásica, se conoce la llamada teoría newtoniana de la gravitación, según la cual la fuerza de atracción entre dos cuerpos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Esta teoría da una muy buena aproximación para la mayoría de los sistemas astrofísicos (sistemas planetarios, estrellas binarias) aunque no explica algunos fenómenos como la precesión de la órbita de Mercurio. En 1916, Einstein obtuvo una teoría de la gravitación compatible con el principio de que la velocidad de la luz es la máxima velocidad de propagación de cualquier señal y con la unidad del espacio y el tiempo. Esta teoría, llamada teoría general de la relatividad, explica la precesión de la órbita de Mercurio así como otros efectos y coincide con la teoría newtoniana en el límite de campos gravitacionales débiles. De acuerdo a la teoría general de la relatividad, la estructura del espaciotiempo está determinada por la presencia de la materia; esto es, la medida de las longitudes y de los intervalos de tiempo depende de la presencia de la materia, de tal manera que la existencia de un campo gravitacional corresponde a una cierta curvatura del espaciotiempo. Los espacios curvos no se pueden describir con la geometría euclidiana —análoga a la geometría del espacio tridimensional usual, en la cual el "elemento de longitud" viene dado por $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$—, sino por una geometría, llamada riemanniana, donde el elemento de longitud (que físicamente determina las longitudes y la duración de los intervalos de tiempo) tiene en general una expresión más complicada.

Es un hecho experimental que estas perturbaciones del espaciotiempo son capaces de curvar un rayo de luz que pase cerca de una fuente gravitatoria: durante un eclipse de Sol se observan desviaciones de los rayos de luz provenientes de las estrellas situadas "atrás" del Sol. El efecto de deflexión de la luz se observa como un corrimiento en la posición de las estrellas durante el eclipse. Este crecimiento se puede determinar fotografiando las estrellas en la vecindad del Sol durante el eclipse y comparando esta fotografía con otra tomada a las mismas estrellas cuando el Sol se encuentra en otra dirección.

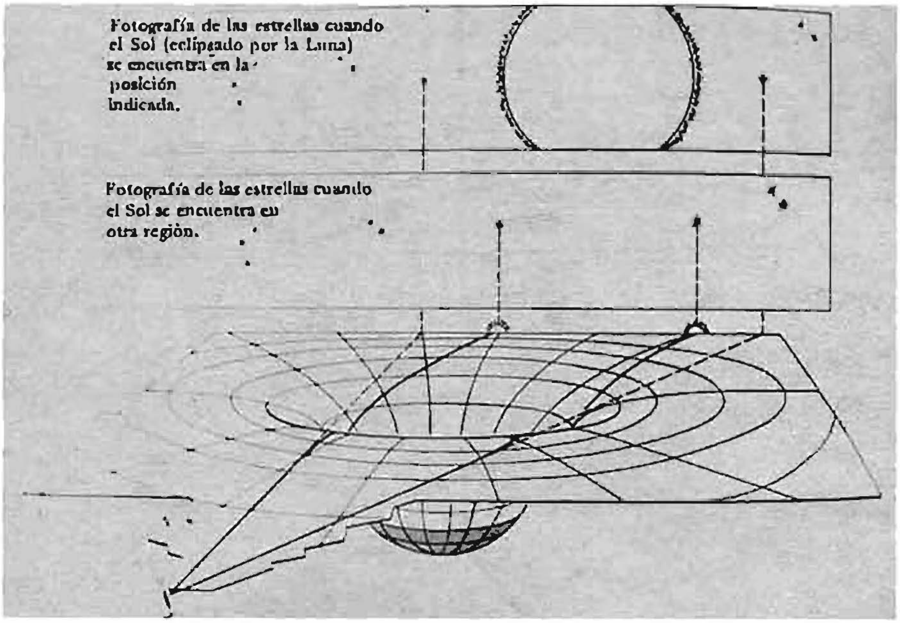


El "puente de Schwarzschild" entre dos universos asintóticamente euclideanos.

Las ecuaciones de Einstein, que determinan el efecto producido por la materia sobre la geometría del espaciotiempo son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales altamente no lineales en cuatro variables, muy difíciles de resolver en general. Pero si se trata de espaciotiempos con simetrías, las ecuaciones son solubles. Por ejemplo, en el caso de una estrella completamente esférica y en estado estático, es decir, donde todos los puntos colocados a una misma distancia del centro y para cualquier tiempo son físicamente equivalentes, la solución a las ecuaciones de Einstein es conocida y de hecho fue encontrada por Schwarzschild en 1916 y se conoce como la solución de Schwarzschild. El elemento de longitud de este espaciotiempo está dado, en coordenadas que corresponden a las coordenadas esféricas usuales, por

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

donde M es la masa de la estrella, G es la constante de gravitación universal, y c es la velocidad de la luz. A pesar de que ésta es una de las soluciones más sencillas de las ecuaciones de Einstein, de ella se puede obtener mucha información de la física del exterior de una estrella. Además recientemente (c. 1975) se ha demostrado que el exterior de un hoyo negro en estado estático tiene simetría esférica y que depende sólo del parámetro de la masa; por tanto, la geometría exterior de un hoyo negro estático queda descrita por la solución de Schwarzschild. Sí, éste es el elemento de longitud del espacio que rodea a un hoyo negro de masa M en estado estático. Fijémonos en el factor que multiplica a dr^2. Cuando r toma el valor $2GM/c^2$



Deflexión de la luz por el Sol como consecuencia de la curvatura del espacio cercano al Sol.

este factor se hace infinito. ¿Qué significa esto? Esto puede indicar una singularidad en el espaciotiempo, esto es, un lugar en que el concepto clásico de espaciotiempo como un espacio con métrica riemanniana pierde sentido; esta singularidad puede corresponder a la presencia de una fuente. Pero también puede ser un efecto introducido por las coordenadas que estamos usando. O sea que esta singularidad desaparecería en algún otro sistema de coordenadas. ¿Cuál es el caso? Aquí ocurre que el espaciotiempo no tiene una singularidad en $r = 2GM/c^2$. Existen varios sistemas de coordenadas en los que esta singularidad aparente desaparece y que además nos dan otra información. Por ejemplo, las coordenadas esféricas en que se ha expresado el elemento ds^2 no describen por completo el espacio que rodea a la estrella. Si se hace una extensión analítica de estas coordenadas se puede saber lo que pasa en regiones en que $r<2GM/c^2$, incluso preguntarse cuál es la geometría de Schwarzschild en ausencia de la estrella. Se esperaría que esta geometría fuese la de una masa puntual M colocada en $r = 0$, pero no es así. Si no está presente la estrella, esta geometría representa un "agujero" o "puente" que conecta dos universos y si se investiga la dinámica (evolución en el tiempo) de este "puente", resulta que fue creado por la unión de dos singularidades $r = 0$, una de cada universo, el "agujero" "crece" hasta alcanzar una circunferencia de $4\pi GM/c^2$ y después se contrae desapareciendo y dejando a los dos universos descontectados y cada uno con su singularidad $r = 0$.

Otra manera de averiguar si en un punto del espacio existe una singularidad física es calcular las fuerzas sentidas en ese punto por un observador que "cae" libremente. Estas fuerzas se miden por las componentes del tensor de curvatura de Riemann. El cálculo de estas componentes en el sistema de referencia de un observador que cae da por resultado un valor finito en $r = 2GM/c^2$. Por lo tanto, en el radio gravitacional ($r = 2GM/c^2$) la geometría se comporta bien; no se trata de una singularidad del espaciotiempo. Esta superficie $r = 2GM/c^2$ constituye el "horizonte" si se trata de un hoyo negro y se dice que una vez cruzada esta superficie es imposible salir de ella. ¿Cómo es ésto? Con el propósito de investigar qué ocurre en el horizonte y dentro de él, imaginemos que viajamos en una nave espacial y a una distancia grande del horizonte enviamos un explorador, el cual se acercará al hoyo negro y nos enviará información a intervalos de tiempo iguales. Lo que sucederá es que a medida que el explorador se acerca al horizonte, la señal que nos manda tardará cada vez más en llegarnos; entre señal y señal transcurrirá más y más tiempo, aunque el explorador sigue enviando las señales a intervalos de tiempo iguales medidos por su reloj. Así pues, aunque en el tiempo medido por el explorador, éste envía señales a intervalos de tiempo iguales, para un observador alejado, estas señales se hacen cada vez más espaciadas, creciendo tal espaciamiento ilimitadamente cuando el explorador llega a la superficie $r = 2GM/c^2$ (el horizonte). Después de esto no nos llegará ninguna información de lo que ocurre en $r = 2GM/c^2$ y mucho menos de la región $r<2GM/c^2$.

Lo que pasa en regiones donde $r<2GM/c^2$ sólo podemos imaginarlo. Dentro del radio gravitacional, en $r = 0$ el viajero encontrará fuerzas gravitacionales infinitas, independientemente de la ruta que se use para llegar allí. $r = 0$ es una singularidad física del espaciotiempo. Para ver que es así basta calcularla curvatura, cantidad invariante, $I = 48G^2M^2/c^4r^6$, la cual es infinia en $r = 0$.

De acuerdo con lo anterior, si se observa una estrella que colapsa la apariencia que muestra es que a medida que la superficie de la estrella se aproxima al radio gravitacional aparentemente reduce su velocidad de colapso, observándose en la luz proveniente de la estrella un corrimiento al rojo y por consiguiente una reducción de su brillantez, hasta que la estrella se vuelve invisible. A un observador distante le parece que la estrella le toma un tiempo infinito alcanzar el horizonte y que nunca lo atraviesa. Las singularidades debidas a colapsos gravitacionales están ocultas a la vista del observador distante por el horizonte. Se supone que cualquier singularidad existente está oculta por un horizonte; esta conjetura se conoce como la "hipótesis de la censura cósmica".

Remolinos en el espaciotiempo

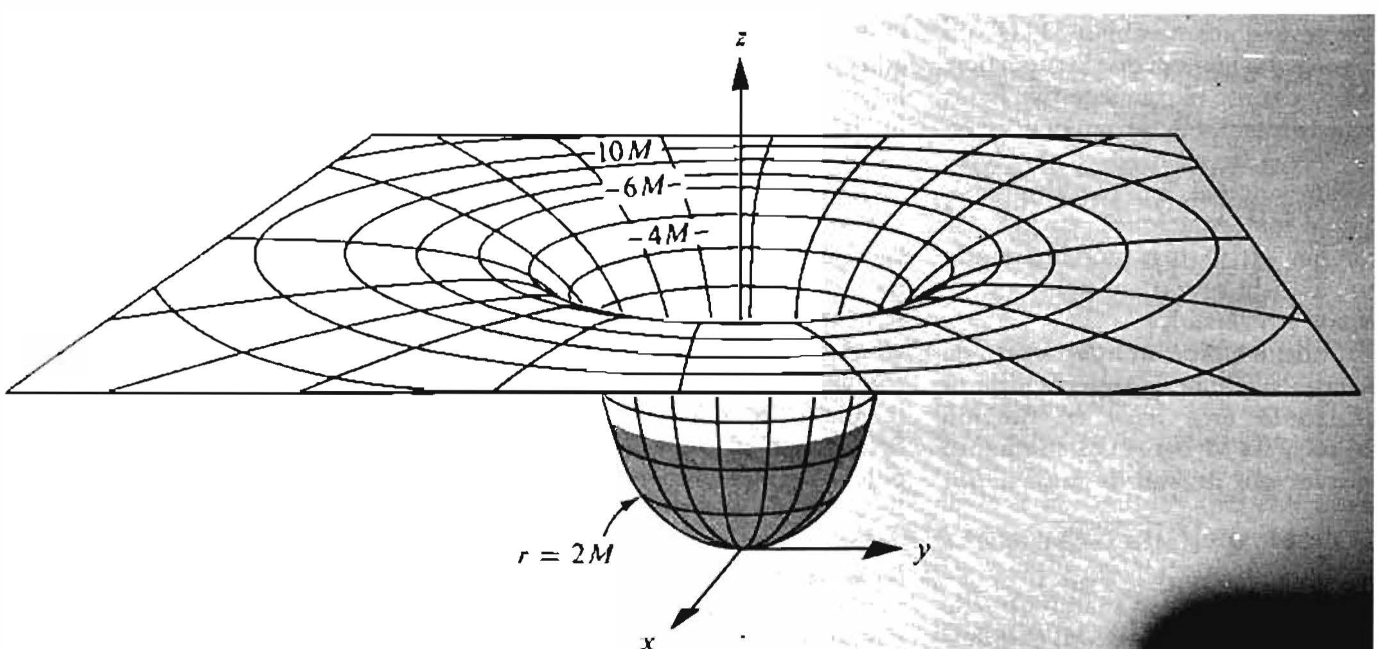
Existen otros hoyos negros más interesantes que los descritos por la métrica de Schwarzschild que además de poseer una cierta masa se caracterizan por estar rotando y por tener carga eléctrica. La solución de Schwarzschild ya no sirve para estudiar el espaciotiempo de estos hoyos negros, sino que es necesario considerar una solución a las ecuaciones de Einstein que involucre a tres parámetros: la masa M, la carga Q y el momento angular por unidad de masa a. La carga Q del hoyo negro va a crear un campo electromagnético, por lo que la solución de que antes hablamos además de satisfacer las ecuaciones de Einstein debe satisfacer las ecuaciones de Maxwell. Además esta solución debe poseer un horizonte. Tal solución se conoce como la geometría de Kerr y Newman junto con el campo electromagnético asociado a ella. Las expresiones de esta métrica y el correspondiente campo electromagnético son un tanto complicadas pero es posible describir sus características cualitativamente. Siempre que se cumpla la desigualdad $M^2 \geqslant Q^2 + a^2$ (en unidades tales que $G = c = 1$) esta métrica posee un horizonte y, por tanto, describe un hoyo negro. De otra manera, si un cuerpo que colapsa no satisface esta condición, las fuerzas centrífugas o de repulsión electromagnética pararán en algún momento el colapso de esta estrella. El que el hoyo negro esté rotando produce un efecto de arrastre, semejante a un remolino, el cual se hace mayor al acercarse al horizonte del hoyo negro. Antes de alcanzar el horizonte, en una superficie llamada límite estático definida por

$$r_0 = M + \sqrt{M^2 - Q^2 - a^2 \cos^2 \theta}$$

(usando como coordenadas r, θ, ϕ, t, donde r, θ, ϕ se reducen a las coordenadas esféricas usuales cuando $a = 0$), ocurre que ningún sistema de referencia (material) puede permanecer en reposo con respecto a las estrellas lejanas, ya que para ello tendría que moverse más rápido que la luz. Todos los observadores con r y θ fijos sobre y dentro de esta superficie deberán orbitar el hoyo negro en la misma dirección que éste rota. El horizonte de estos hoyos negros está localizado en

$$r_H = M + \sqrt{M^2 - Q^2 - a^2}$$

y, como en el horizonte de Schwarzschild, las partículas y fotones que caen dentro de él nunca pueden escapar. Como vemos de sus respectivas expresiones, $r_0 \neq r_H$, excepto cuando $\theta = 0°, 180°$, ésto es, r_0 y r_H son dos superficies que se tocan en dos puntos; a la región limitada por estas superficies (límite estático y horizonte) se le llama ergoesfera. Si el hoyo negro no posee rotación ($a = 0$) entonces el horizonte y el límite estático coinciden y no hay ergoesfera. La ergoesfera tiene mucha importancia en relación a la extracción de energía de un hoyo negro.



Representación gráfica de la geometría alrededor (en blanco) y dentro (en gris) de una estrella de radio $R = 2.66\ GM/c^2$.

La dinámica de hoyos negros

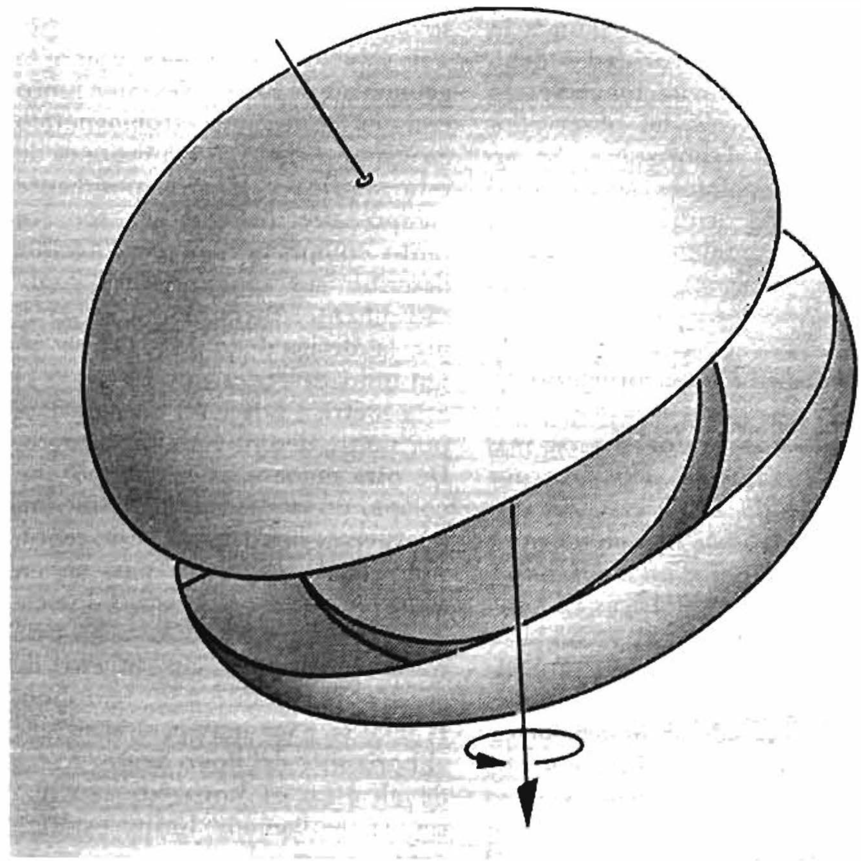
Los procesos que hemos descrito están gobernados por las ecuaciones de la relatividad general, las ecuaciones de Maxwell, etc. De estas leyes de la física se pueden derivar reglas o constricciones para los procesos que ocurren en los hoyos negros. A este conjunto de leyes (cuatro) se le ha llamado "dinámica de hoyos negros". La primera ley es semejante a la primera ley de la termodinámica, se refiere a la conservación de la energía total, del momento total, del momento angular y de la carga.

Cuando dos hoyos negros chocan y se fusionan, el área superficial del horizonte del hoyo negro resultante debe ser mayor que la suma de las superficies de los horizontes de los dos hoyos negros iniciales. O sea que la suma de las superficies de los horizontes de uno o varios hoyos negros involucrados en una colisión o fusión o cualquier otro proceso nunca decrece. Esta es la segunda ley de la dinámica de hoyos negros. Esta ley permite clasificar los procesos que ocurren en un hoyo negro en reversibles e irreversibles. Las transformaciones reversibles cambian M, Q o a pero de tal manera que la superficie del horizonte permanece fija. Estas transformaciones se pueden invertir llevando al hoyo negro a su estado original. En cambio, aquellas transformaciones en que se cambia M, Q o a incrementando con ello la superficie del horizonte son irreversibles.

Consideremos un hoyo negro de Kerr y Newman, la superficie de su horizonte está dada en función de su masa M, carga Q y momento angular por unidad de masa a, por

$$A = 4\pi\left[\left(M+\sqrt{M^2-Q^2-a^2}\right)^2 + a^2\right]$$

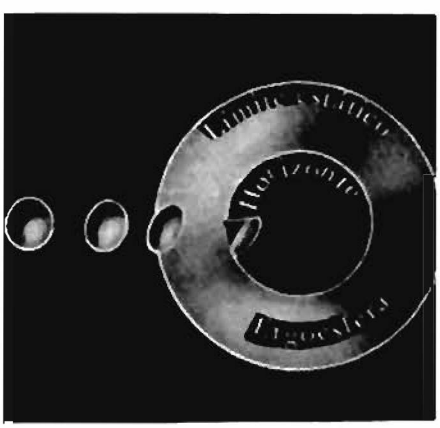
La interacción con materia puede cambiar los valores de M, Q o de a de varias maneras, de modo que M puede disminuir en un determinado proceso; esto es, se puede extraer energía de un hoyo negro. Si cualquier cambio en M, en Q o en a provoca que A aumente, ningún proceso futuro hará que el hoyo negro regrese a su estado inicial. La extracción reversible de carga y momento angular a de un hoyo negro (decremento de Q y a con A fija) necesariamente reduce la masa del hoyo negro (extracción de energía); si en algún momento se extraen toda la carga y momento angular del hoyo negro, la masa tomará un valor irreducible que es la masa de un hoyo negro de Schwarzschild de superficie A. El colapso gravitacional de una estrella real con asimetría no se puede describir con estas soluciones sino hasta que el colapso ha finalizado y la estrella llega a un estado estacionario el cual está carcterizado únicamente por su masa, carga y momento angular y por tanto puede ser descrito por la solución de Kerr y Newman.



Representación gráfica del horizonte, la ergoesfera y el límite estático para un hoyo negro con rotación.

Además de los hoyos negros formados por colapsos de estrellas se supone que en el Universo hay hoyos negros menores que se formaron en los primeros tiempos del Universo, debido a fluctuaciones en la densidad. De acuerdo a los modelos aceptados, el Universo surgió de una gran explosión (*big bang*) después de la cual la materia se fue enfriando y condensando por regiones para formar las estrellas y galaxias. Se estima que una buena parte de la masa del disco que es nuestra galaxia fue depositada en estrellas capaces de colapsar en hoyos negros, de modo que la Vía Láctea puede contener del orden de 10^9 hoyos negros.

Pero, ¿dónde y cómo buscar un hoyo negro? Los hoyos negros pueden ser cuerpos "blancos" y resplandecientes pues el gas que rodea a un hoyo negro es "jalado" hacia adentro del hoyo negro y en este proceso el gas es calentado por compresión adiabática, ondas de choque, turbulencias, viscosidad, etc. de modo que antes de alcanzar el horizonte, el gas puede llegar a calentarse tanto que emita un gran flujo de rayos X y aun puede llegar a emitir rayos gama. Esto hace que en una estrella binaria formada por un hoyo negro y una estrella visible, aunque el hoyo negro sea ópticamente invisible pueda detectarse su presencia por la emisión de rayos X y rayos gama; la luz de la estrella visible muestra corrimientos Doppler debido al movimiento de la estrella alrededor del centro de masas común y su velocidad y periodo dan información de la masa de la componente invisible del sistema binario. Si la masa de esta componente invisible es cuatro masas solares o más, no podrá tratarse de una estrella ordinaria, pues una estrella ordinaria con esa masa debería tener $(4)^3 = 64$ veces la luminosidad del Sol; tampoco puede tratarse de una enana blanca o de una estrella de neutrones, porque cualquiera de éstas, siendo tan pesadas, no podrían mantener su equilibrio y colapsarían en un hoyo negro. En este caso la idea de identificar a la componente invisible del sistema con un hoyo negro es muy atractiva.



Vista "superior" de un hoyo negro rotante mostrando la orientación de los conos de luz.

Los efectos cuánticos

Uno de los resultados recientes más interesantes en la teoría gravitatoria y el cual se supone que puede conducir a consecuencias observables es la predicción de que un hoyo negro crea partículas. En 1975, S. Hawking halló que, incorporando elementos de la mecánica cuántica en la teoría general de la relatividad, los hoyos negros crean partículas por pares, una de estas partículas cae dentro del horizonte y la otra escapa al infinito.

La razón de emisión predicha para un hoyo negro coincide con la emisión térmica de un cuerpo a la tempetatura $\kappa/2\pi$, siendo κ la gravedad superficial del hoyo negro. Esta es quizá la razón más fuerte para creer que los hoyos negros pueden crear y emitir partículas. Hay otras bases para considerar que un múltiplo de la gravedad superficial del hoyo negro es análogo a la temperatura. Existe una analogía entre la segunda ley de la termodinámica y la segunda ley de la dinámica de los hoyos negros, según la cual el área del horizonte nunca puede disminuir. También hay analogía con la primera ley de la termodinámica en el resultado de que dos hoyos negros con estados de equilibrio cercanos están relacionados por $dM = \frac{\kappa}{8\pi} dA + \Omega d\alpha$, donde M es la masa, Ω es la velocidad angular, α es el momento angular del hoyo negro y A es el área del horizonte. Comparando con la relación termodinámica $dU = TdS + pdV$, donde U es la energía interna, T es la temperatura absoluta, p es la presión y V es el volumen, se ve que si se considera a un múltiplo del área A como análogo de la entropía, entonces un múltiplo de κ será análogo a la temperatura. Por lo que si se acepta que un hoyo negro emite partículas tendremos que aceptar que hay una entropía y una temperatura asociadas con un hoyo negro. Hawking dice que una posible explicación de esta emisión es el "efecto túnel" de la mecánica cuántica, que hace posible que una partícula "tunelé" hacia afuera del hoyo negro a través del horizonte y escape al infinito. El efecto túnel se observa en los núcleos atómicos y consiste en que para una partícula que se encuentra confinada (en el núcleo) y que clásicamente es imposible que "escape", la mecánica cuántica da una probabilidad distinta de cero para que la partícula salga de dicho confinamiento. La emisión de partículas por un hoyo negro se podría interpretar como la creación espontánea de un par de partículas, una con energía negativa la cual "cae" al hoyo negro y otra partícula con energía positiva que escapa al infinito. Estas partículas que escapan constituirían la emisión térmica antes mencionada.

En lo anterior subyace el problema de encontrar una teoría de la relatividad general que tome en cunta los aspectos cuánticos de la materia; esto es, cuantizar el campo gravitatorio. Como se sabe, el campo electromagnético se ha cuantizado suponiendo que está formado por un conjunto de osciladores con una energía definida, pero en la relatividad general no es posible definir la energía del campo gravitacional. Esto no quiere decir que la relatividad general no pueda hacerse compatible con la mecánica cuántica, pero hata hoy éste sigue siendo un problema abierto.

Einstein no atacó este problema pues no miraba con buenos ojos la mecánica cuántica debido a su indeterminismo (principio de incertidumbre), él decía que "Dios no juega a los dados", pero algunas de las últimas versiones cuánticas del campo gravitatorio dan resultados que indican que, en palabras de Hawking, "Dios no sólo juega a los dados sino que a veces tira los dados donde no pueden ser vistos".