

# **CLASIFICANDO LOS AGUJEROS NEGROS**

Desde el punto de vista teórico, los agujeros negros se clasifican de acuerdo con las características físicas que poseen, las cuales están restringidas por el denominado *teorema de no-pelo* a solamente masa, carga eléctrica y momento angular, como se describe a continuación. Por otra parte, también es usual establecer ciertas categorías de agujeros negros de acuerdo con el tamaño que estos poseen.

## *Clasificación de acuerdo con las Características Físicas*

Desde el punto de vista teórico, los trabajos de físicos como Werner Israel, Brandon Carter y David Robinson permitieron mostrar que los agujeros negros descritos por la Relatividad General son objetos extremadamente simples, en el sentido que solo poseen tres características que los distinguen: su masa, su carga eléctrica y su momento angular (rotación). Este resultado se conoce en la física como el *Teorema de no-*

pelo<sup>23</sup>, y tiene como consecuencia que todo observador externo solamente podrá medir estas tres propiedades. De esta forma, los agujeros negros en la Relatividad General solo pueden pertenecer a uno de cuatro posibles grupos:

### **Agujeros negros no-rotantes sin carga eléctrica**

Estos objetos poseen masa y no rotan sobre si mismos. Son descritos por la solución matemática encontrada por Karl Schwarzschild en 1916 y representan una idealización del objeto real ya que son perfectamente esféricos. Además, las observaciones muestran que, en la naturaleza, los objetos astrofísicos suelen poseer momento angular, por lo que esta clase de objetos no describirá correctamente los agujeros negros provenientes del colapso estelar.

Sin embargo, debido a que la estructura matemática del espacio-tiempo de Schwarzschild es mucho más simple que la de las demás soluciones, ésta suele utilizarse como primera aproximación para la descripción de los agujeros negros en muchas ocasiones.

### **Agujeros negros no-rotantes con carga eléctrica**

Al poseer masa y carga eléctrica y al ser completamente esféricos, estos agujeros negros estarán rodeados por un campo eléctrico también con simetría esférica. Son descritos por la solución matemática encontrada, independientemente, por Hans Reissner (1916) y Gunnar Nordström (1918). Aún

---

<sup>23</sup> El nombre de este teorema proviene de la expresión “los agujeros negros no tienen pelo” utilizada por los físicos John A. Wheeler y Kip Thorne para referirse a que los agujeros negros no poseen características visibles o distintivas para un observador externo diferentes a las tres enunciadas.

cuando a nivel astrofísico la carga eléctrica no es relevante porque los cuerpos celestes se neutralizan con partículas de su entorno, la solución de Reissner-Nordström es muy estudiada a nivel académico. Dentro de sus propiedades físicas más interesantes se encuentra que posee no uno, sino dos horizontes de forma esférica y concéntricos. El más externo hace el papel del horizonte de eventos, siendo el punto de no retorno, mientras que el horizonte interno posee propiedades gravitacionales no convencionales y suele asociarse con los denominados *agujeros blancos*. La descripción de estas y otras características serán abordadas en el siguiente capítulo, en donde se estudiará la estructura de los agujeros negros.

## Agujeros negros rotantes sin carga eléctrica

Esta solución es la más importante a nivel astrofísico porque describe apropiadamente lo esperado para objetos compactos provenientes de un colapso estelar. Debido a que las estrellas rotan sobre si mismas y ya que el momento angular se conservaría durante el colapso gravitacional, los agujeros negros que resulten de este tipo de procesos poseerán una velocidad de rotación muy alta<sup>24</sup>. La solución que describe estos objetos compactos rotantes fue encontrada por Roy Kerr en 1963 y su estructura matemática es de mayor complejidad que la de la solución de

---

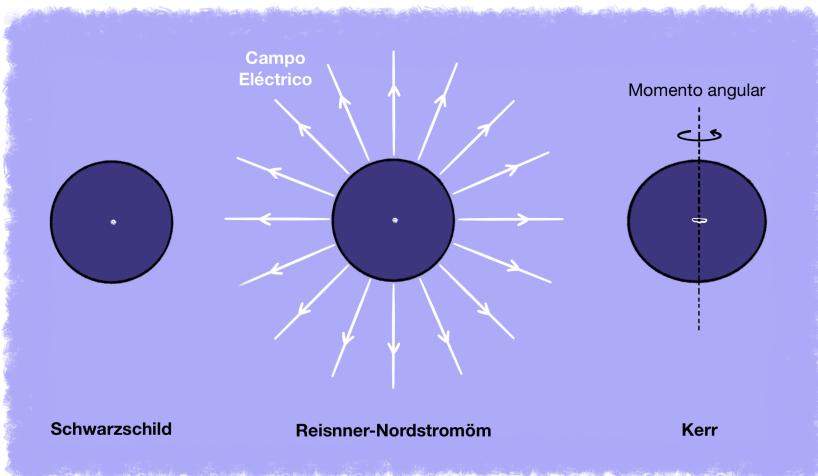
<sup>24</sup> La mejor analogía para comprender la relación entre la conservación del momento angular y la velocidad de rotación consiste en una patinadora sobre hielo que rota sobre sí misma con los brazos extendidos. Asumiendo que la fricción de los patines y el hielo es despreciable, el momento angular de la patinadora se conservará mientras ella rota y acerca los brazos hacia su cuerpo. La experiencia nos muestra que debido a esta conservación y por el cambio en la distribución de su masa, por acercar los brazos, su velocidad de rotación aumentará.

Schwarzschild. Desde el punto de vista físico el espacio-tiempo generado no posee simetría esférica, pero si existen dos horizontes, al igual que en la solución de Reissner-Nordström. Por otra parte, la singularidad que posee en su interior no tiene la forma geométrica de un punto sino la de un anillo. Finalmente, los agujeros negros rotantes poseen una estructura adicional en la región externa del horizonte de eventos que los hace más interesantes: ésta corresponde a una superficie a partir de la cual toda partícula, incluidos los fotones, estará obligada a rotar junto con el agujero. En los siguientes capítulos describiremos con mas detalle este tipo de objetos y sus características.

### **Agujeros negros rotantes con carga eléctrica**

Los agujeros negros con los tres parámetros físicos que permite el teorema del no-pelo corresponden a una generalización de la solución de Kerr que fue encontrada en 1965 por Ezra Newman. Debido a que estos objetos poseerían un campo eléctrico y además se encuentran rotando sobre sí mismos, se generará un campo magnético adicional en su entorno. Por esta razón, aún cuando desde el punto de vista de la astrofísica no se espera que existan objetos con estas características en la naturaleza, su estudio teórico es muy importante.

Es importante resaltar de nuevo que, desde el punto de vista astrofísico, la carga eléctrica no es relevante porque los cuerpos celestes tienden a neutralizar cualquier carga extra que puedan poseer con las cargas libres disponibles en su entorno. Por otra parte, la rotación parece ser una característica presente en casi cualquier objeto astrofísico. Por ello, la solución de Kerr es la más apropiada y utilizada en este contexto.



De acuerdo con el teorema de no-pelo, un observador externo solamente puede observar tres características físicas para los agujeros negros: masa, carga eléctrica y momento angular. En la figura se ilustran tres de los agujeros negros que existirían de acuerdo con este teorema.

También es importante notar que el teorema de no-pelo ha sido demostrado únicamente dentro del contexto de la relatividad general, por lo que no es necesariamente válido para agujeros negros en teorías gravitacionales alternativas como la teoría de cuerdas, las teorías  $f(R)$  y otras. De esta forma es posible encontrar agujeros negros con características físicas adicionales a las permitidas por el teorema del no-pelo cuando se trabaja este otro tipo de teorías,

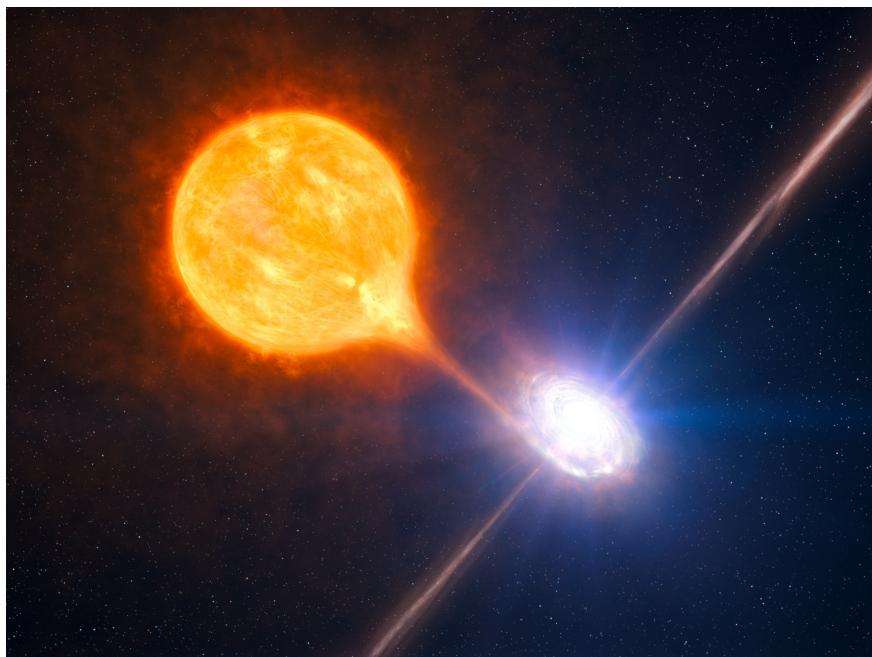
### *Clasificación de acuerdo con la Masa*

Claramente, la masa es la característica común para todos los agujeros negros. Debido a ello es usual clasificar estos objetos de acuerdo con su contenido de materia/energía o equivalentemente de acuerdo con su tamaño, ya que el radio

del horizonte de eventos es proporcional a la masa del agujero. Las observaciones astronómicas han mostrado que en el Universo existen al menos dos clases de agujeros negros de acuerdo con su tamaño: estelares y supermasivos, mientras que desde el punto de vista teórico se ha propuesto la existencia de una tercera clase, los agujeros primordiales o microscópicos.

### **Agujeros negros estelares**

Estos objetos poseen masas que van desde las 3 hasta los cientos de masas solares y su origen tiene lugar con la muerte

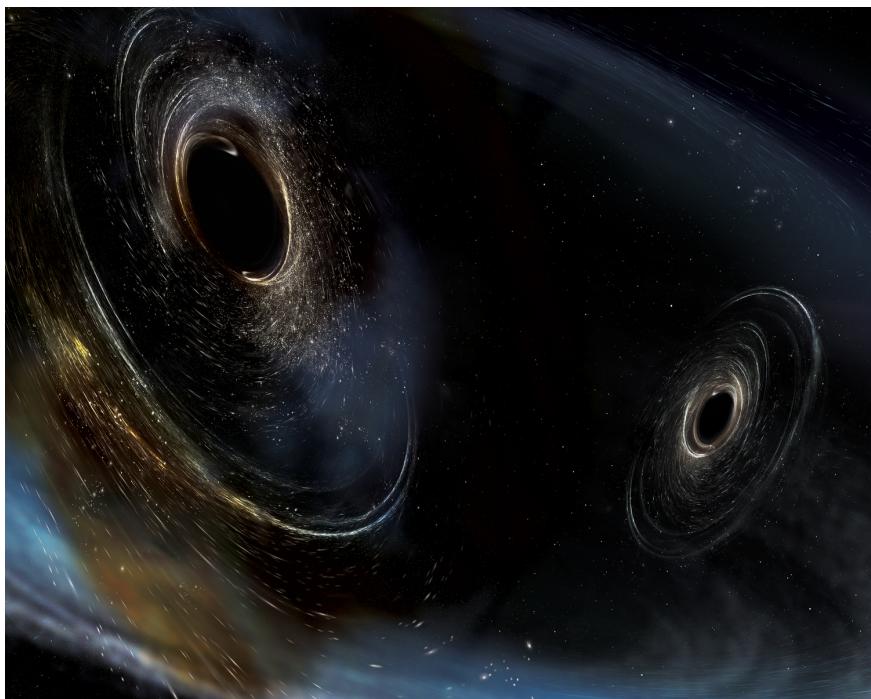


*Esta impresión artística muestra la imagen de un agujero negro estelar en un sistema binario donde el segundo miembro es una estrella. La materia que se desprende de las capas externas es capturada por el objeto compacto para producir las huellas electromagnéticas que permitirán estimar las características físicas del agujero negro.*

[Crédito Imagen: ESO/L. Calçada/M.Kornmesser](#)

de estrellas con una masa inicial lo suficientemente grande. El rango de masas considerado implica que el radio del horizonte de eventos de estos agujeros se encuentra en el orden de los kilómetros a los cientos de kilómetros.

En la actualidad, los agujeros negros estelares han sido observados en dos situaciones particulares. La primera corresponde a sistemas binarios en donde uno de los miembros del par es un agujero negro (con masas en el rango de 5 a 20 masas solares) y el otro miembro es una estrella. Gracias a la interacción gravitacional y a procesos como la acreción es posible visualizar y estimar las propiedades físicas de los dos elementos del sistema binario.



*Dos agujeros negros en un sistema binario emiten ondas gravitacionales con un patrón específico como los detectado por los observatorios LIGO y VIRGO. Cuando el sistema pierde energía debido a la radiación gravitacional, los dos agujeros negros se fusionan para formar un solo agujero negro.*

*[Crédito Imagen: LIGO/Caltech/MIT/Sonoma State \(Aurore Simonnet\)](#)*

La segunda situación en las que se han comprobado los agujeros negros estelares corresponde a detecciones recientes realizadas por observatorios de ondas gravitacionales como LIGO o VIRGO<sup>25</sup>. En ellas se reportaron las ondas gravitacionales producidas por la fusión de sistemas binarios en donde los dos elementos corresponderían a agujeros negros. Al finalizar estos procesos de fusión, se ha dado lugar a agujeros negros con masas finales del orden de 60 masas solares.

## Agujeros negros supermasivos

Evidencia observacional indica la existencia de esta clase de agujeros negros en el centro de casi todas las galaxias del Universo. Se denominan supermasivos porque poseen masas estimadas en el orden de millones o incluso billones de masas solares y por lo tanto, el radio de su horizonte de eventos está en el rango de los millones o billones de kilómetros. Recordando que la distancia entre el Sol y la Tierra es aproximadamente 150 millones de kilómetros<sup>26</sup>, es posible asegurar que los agujeros negros supermasivos tienen dimensiones comparables con el tamaño del Sistema Solar.

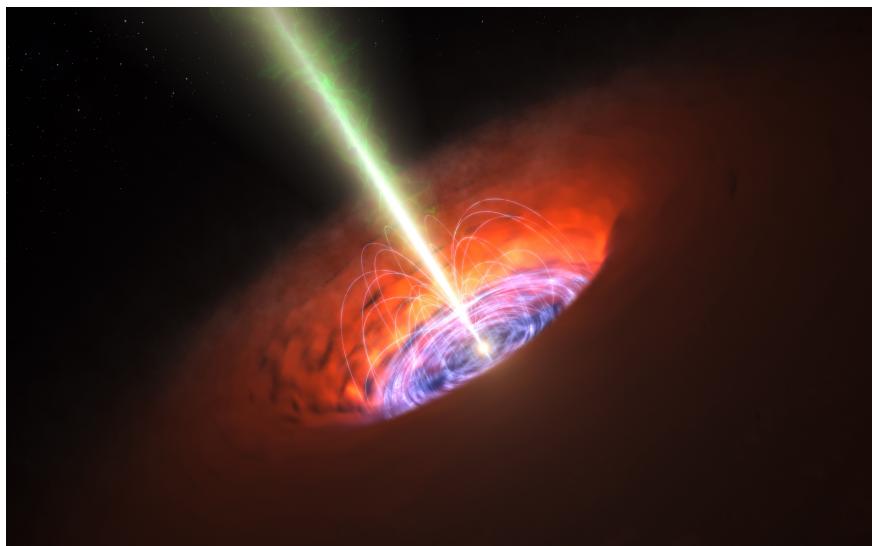
El origen de los agujeros supermasivos no es entendido completamente hoy en día, aún cuando existen diferentes modelos que podría explicar su formación. Sin embargo, es

---

<sup>25</sup> LIGO son las iniciales del Observatorio de Ondas gravitacionales por Interferometría Laser (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). VIRGO es el nombre del interferómetro localizado en el Observatorio Gravitacional Europeo (EGO), en Italia.

<sup>26</sup> La distancia Tierra-Sol define la llamada *Unidad Astronómica* y equivale a 1AU = 149 597 870 km.

claro que éstos juegan un papel determinante en la formación y evolución galáctica al mantener unidos todos los componentes de las galaxias (nubes de gas y polvo, estrellas, planetas, etc.) mediante su enorme campo gravitacional. Además, esta clase de agujeros son el componente fundamental en el modelo unificado de los AGN, al ser los responsables de las grandes cantidades de energía liberadas que dan las características electromagnéticas de los núcleos activos, como se describirá en un capítulo posterior.



*Los agujeros negros supermasivos son el componente fundamental del modelo unificado de las galaxias activas. En esta impresión artística se representa el núcleo de una de estas galaxias y se observa la estructura de acreción y los jets relativistas que proveen la energía necesaria para explicar las características observacionales de los AGNs.*

[Crédito Imagen: ESO/L. Calçada](#)

## Agujeros negros primordiales o microscópicos

La idea teórica de estos objetos comenzó con los trabajos de J. A. Wheeler en la década de 1960, cuando él y algunos de sus colaboradores pensaron en la posibilidad de agujeros negros con el tamaño de átomos o incluso más pequeños. Dependiendo el modelo teórico, los agujeros negros microscópicos podrían tener masas tan pequeñas como  $10^{-8}$  kg. El adjetivo *primordial* hace referencia a que el origen de estos agujeros negros no se debe a la muerte de una estrella, sino que, como fue propuesto por el físico inglés Stephen Hawking en los años 70's, estos deberían haber sido creados en las etapas tempranas del Universo, menos de un segundo después del Big Bang. En este escenario, la densidad de energía pudo ser tan elevada como para que en algunas regiones del espacio se presente una concentración de masa/energía dentro del correspondiente radio de Schwarzschild. Esto produciría un colapso total inmediato hasta el tamaño de un punto, formando el agujero negro microscópico.

Los estimados teóricos muestran que deberían haberse creado millones de estos agujeros negros en el Universo temprano, aún cuando hasta el día de hoy no se ha logrado evidencia observacional de ninguno de ellos<sup>27</sup>. Una

---

<sup>27</sup> Desde mediados del 2019 algunos físicos han propuesto la existencia de un agujero negro primordial en el Sistema Solar para explicar el comportamiento inusual de algunos Objetos Trans-Neptunianos (TNOs). Inicialmente se apuntó a la existencia de un nuevo planeta (a veces denominado Planeta 9 o Planeta X) pero los cálculos llevarían a que este nuevo integrante del Sistema Solar debería poseer una masa del orden de 10 a 20 veces la masa de la Tierra y debería estar localizado a una distancia de entre 45 a 150 billones de kilómetros del Sol. Desafortunadamente, ninguna observación directa de este objeto ha sido lograda y por ello la propuesta de que pueda ser un agujero negro primordial con un tamaño del orden de los centímetros ha sido considerada. Para detalles ver el artículo de Scholtz, J. y Unwin, J. (2019).

explicación al por qué no han sido observados radica en el proceso de evaporación por radiación Hawking, según el cual los agujeros negros emiten radiación electromagnética con una energía proporcional al inverso de su masa. Esto quiere decir que agujeros con poca masa emiten muy fuertemente, mientras que los agujeros estelares o supermasivos prácticamente no emiten. Ahora bien, la energía de la radiación proviene directamente de la masa del agujero, por

### **¿Cómo medir la masa de un agujero negro?**

Ya que la masa es la propiedad física común a todos los agujeros negros, es usual preguntarse cómo puede ser medida por los astrónomos. Si el agujero negro se encuentra en una región del espacio en la cual no se encuentren estrellas, nubes de gas ni otra clase de objetos astrofísicos, no existe forma de estimar su masa (es más, ¡ni siquiera sería posible saber que allí se encuentra un agujero negro porque no habría forma de observarlo!).

Por otra parte, si el agujero negro se encuentra en una región donde existan estrellas u otra clase de objetos visibles, se puede estimar la masa del agujero utilizando los efectos de su influencia gravitacional. Por ejemplo, en el caso de un agujero negro estelar que se encuentre acompañado de una estrella visible en un sistema binario, los astrónomos pueden medir la distancia entre los dos objetos y el periodo de movimiento del sistema. Con estos datos y utilizando la ley universal de gravitación Newtoniana (o la relatividad general), es posible estimar la masa total del sistema y eventualmente acotar la masa del agujero negro.

En el caso de agujeros negros supermasivos la técnica es la misma, salvo que allí las estrellas en su entorno se encontrarán en órbita alrededor del objeto supermasivo, por lo que el resultado de aplicar la ley gravitacional Newtoniana será directamente la masa del agujero.

lo que después de un tiempo adecuado emitiendo radiación, el agujero puede perder toda su masa y desaparecería (se suele decir que el agujero negro se evapora). Los cálculos teóricos indicarían que el tiempo transcurrido desde el Big Bang es suficiente para que cualquier agujero negro primordial con masa igual o inferior a  $10^{17}$  kg haya desaparecido para la época actual, haciendo imposible su detección hoy en día.

En los siguientes capítulos se presentarán con detalle las características y propiedades de los agujeros negros a nivel astrofísico descritos por las soluciones de Schwarzschild y Kerr. Debido a que en la actualidad no existe evidencia observational de los agujeros primordiales, estos no se tendrán en cuenta en la discusión.