

LOS AGUJEROS NEGROS

Un **agujero negro**¹ u **hoyo negro** es una región finita del espacio en cuyo interior existe una concentración de masa lo suficientemente elevada como para generar un campo gravitatorio tal que ninguna partícula material, ni siquiera la luz, puede escapar de ella. Sin embargo, los agujeros negros pueden ser capaces de emitir radiación, lo cual fue conjeturado por Stephen Hawking en la década de 1970. La radiación emitida por agujeros negros como Cygnus X-1 no procede del propio agujero negro sino de su disco de acreción.³

La gravedad de un agujero negro, o «curvatura del espacio-tiempo», provoca una singularidad envuelta por una superficie cerrada, llamada horizonte de sucesos. Esto es previsto por las ecuaciones del campo de Einstein. El horizonte de sucesos separa la región del agujero negro del resto del universo y es la superficie límite del espacio a partir de la cual ninguna partícula puede salir, incluyendo los fotones. Dicha curvatura es estudiada por la relatividad general, la que predijo la existencia de los agujeros negros y fue su primer indicio. En la década de 1970, Hawking, Ellis y Penrose demostraron varios teoremas importantes sobre la ocurrencia y geometría de los agujeros negros.⁴ Previamente, en 1963, Roy Kerr había demostrado que en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones todos los agujeros negros debían tener una geometría cuasiesférica determinada por tres parámetros: su masa M , su carga eléctrica total e y su momento angular L .

Se conjetura que en el centro de la mayoría de las galaxias, entre ellas la Vía Láctea, hay agujeros negros supermasivos.⁵

El 11 de febrero de 2016, las colaboraciones LIGO, Virgo y GEO600 anunciaron la primera detección de ondas gravitacionales, producidas por la fusión de dos agujeros negros a unos 410 millones de pársecs, megapársecs o Mpc, es decir, a unos 1337 millones de años luz, mega-años luz o Mal de la Tierra.⁶ Las observaciones demostraron la existencia de un sistema binario de agujeros negros de masa estelar y la primera observación de una fusión de un agujero negro binario. Anteriormente, la existencia de agujeros negros estaba apoyada en observaciones astronómicas de forma indirecta, a través de la emisión de rayos X por estrellas binarias y galaxias activas.

La gravedad de un agujero negro puede atraer al gas que se encuentra a su alrededor, que se arremolina y calienta a temperaturas de hasta 12 millones de grados Celsius, esto es, 2000 veces mayor temperatura que la superficie del Sol.⁷

Los agujeros negros proceden de un proceso de colapso gravitatorio que fue ampliamente estudiado a mediados de siglo XX por diversos científicos, particularmente Robert Oppenheimer, Roger Penrose y Stephen Hawking entre otros. Hawking, en su libro divulgativo *Historia del tiempo: del Big Bang a los agujeros negros* (1988), repasa algunos de los hechos bien establecidos sobre la formación de agujeros negros.

Este proceso comienza después de la "muerte" de una gigante roja (estrella de 30 o más veces la masa del Sol), entendiéndose por "muerte" la extinción total de su energía. Tras varios miles de millones de años de vida, la fuerza gravitatoria de dicha estrella comienza a ejercer fuerza sobre sí misma originando una masa concentrada en un pequeño volumen, convirtiéndose en una enana

blanca. En este punto, dicho proceso puede proseguir hasta el colapso de dicho astro por la autoatracción gravitatoria que termina por convertir a esta enana blanca en un agujero negro. Este proceso acaba por reunir una fuerza de atracción tan fuerte que atrapa hasta la luz en este.

En palabras más simples, un agujero negro es el resultado final de la acción de la gravedad extrema llevada hasta el límite posible. La misma gravedad que mantiene a la estrella estable, la empieza a comprimir hasta el punto que los átomos comienzan a aplastarse. Los electrones en órbita se acercan cada vez más al núcleo atómico y acaban fusionándose con los protones, formando más neutrones..

Por lo que este proceso comportaría la emisión de un número elevado de neutrinos. El resultado final, una estrella de neutrones. En este punto, dependiendo de la masa de la estrella, el plasma de neutrones dispara una reacción en cadena irreversible, la gravedad aumenta enormemente al disminuirse la distancia que había originalmente entre los átomos. Las partículas de neutrones implosionan, aplastándose más, logrando como resultado un agujero negro, que es una región del espacio-tiempo limitada por el llamado horizonte de sucesos. Los detalles de qué sucede con la materia que cae más allá de este horizonte dentro de un agujero negro no se conocen porque para escalas pequeñas sólo una teoría cuántica de la gravedad podría explicarlos adecuadamente, pero no existe una formulación completamente consistente con dicha teoría.

Según su origen, teóricamente pueden existir al menos tres clases de agujeros negros:

Según la masa

- **Agujeros negros supermasivos:** con masas de varios millones de masas solares. Se hallarían en el corazón de muchas galaxias. Se forman en el mismo proceso que da origen a los componentes esféricos de las galaxias.
- **Agujeros negros de masa estelar.** Se forman cuando una estrella de masa 2,5 veces mayor que la del Sol se convierte en supernova e implosiona. Su núcleo se concentra en un volumen muy pequeño que cada vez se va reduciendo más. Este es el tipo de agujeros negros postulados por primera vez dentro de la teoría de la relatividad general.
- **Micro agujeros negros.** Son objetos hipotéticos, algo más pequeños que los estelares. Si son suficientemente pequeños, pueden llegar a evaporarse en un período relativamente corto mediante emisión de radiación de Hawking. Este tipo de entidades físicas es postulado en algunos enfoques de la gravedad cuántica, pero no pueden ser generados por un proceso convencional de colapso gravitatorio, el cual requiere masas superiores a la del Sol.

Existe un teorema sobre propiedades de los agujeros negros que se suele enunciar diciendo que «un agujero negro no tiene pelo» (en inglés *No-hair theorem*); el teorema afirma que cualquier objeto que sufra un colapso gravitatorio alcanza un estado estacionario como agujero negro descrito sólo por tres parámetros: su masa M , su carga Q y su momento angular L . Así tenemos la siguiente clasificación para el estado final de un agujero negro:

- El agujero negro más sencillo posible es el agujero negro de Schwarzschild, que no rota ni tiene carga.
- Si no gira pero posee carga eléctrica, se tiene el llamado agujero negro de Reissner-Nordstrøm.
- Un agujero negro en rotación y sin carga es un agujero negro de Kerr.
- Si además posee carga, hablamos de un agujero negro de Kerr-Newman.

En las cercanías de un agujero negro se suele formar un disco de acrecimiento, compuesto de materia con momento angular, carga eléctrica y masa, la que es afectada por la enorme atracción gravitatoria del mismo, ocasionando que inexorablemente atravesase el horizonte de sucesos y, por lo tanto, incrementa el tamaño del agujero.

Véase también: *Acreción*

En cuanto a la luz que atraviesa la zona del disco, también es afectada, tal como está previsto por la teoría de la Relatividad. El efecto es visible desde la Tierra por la desviación momentánea que produce en posiciones estelares conocidas, cuando los haces de luz procedentes de las mismas transitan dicha zona.

Hasta hoy es imposible describir lo que sucede en el interior de un agujero negro; sólo se puede imaginar, suponer y observar sus efectos sobre la materia y la energía en las zonas externas y cercanas al horizonte de sucesos y la ergosfera.

Uno de los efectos más controvertidos que implica la existencia de un agujero negro es su aparente capacidad para disminuir la entropía del Universo, lo que violaría los fundamentos de la termodinámica, ya que toda materia y energía electromagnética que atravesase dicho horizonte de sucesos, tienen asociados un nivel de entropía. Stephen Hawking propone en uno de sus libros que la única forma de que no aumente la entropía sería que la información de todo lo que atravesase el horizonte de sucesos siga existiendo de alguna forma.

Otra de las implicaciones de un agujero negro supermasivo sería la probabilidad que fuese capaz de generar su colapso completo, convirtiéndose en una singularidad desnuda de materia.

Según Stephen Hawking, en los agujeros negros se viola el segundo principio de la termodinámica, lo que dio pie a especulaciones sobre viajes en el espacio-tiempo y agujeros de gusano. El tema está siendo motivo de revisión; actualmente Hawking se ha retractado de su teoría inicial y ha admitido que la entropía de la materia se conserva en el interior de un agujero negro (véase enlace externo). Según Hawking, a pesar de la imposibilidad física de escape de un agujero negro, estos pueden terminar evaporándose por la llamada radiación de Hawking, una fuente de rayos X que escapa del horizonte de sucesos.

El legado que entrega Hawking en esta materia es de aquellos que, con poca frecuencia en física, son calificados de bellos. Entrega los elementos matemáticos para comprender que los agujeros negros tienen una entropía gravitacional intrínseca. Ello implica que la gravedad introduce un nivel adicional de impredecibilidad por sobre la incertidumbre cuántica. Parece, en función de la actual

capacidad teórica, de observación y experimental, como si la naturaleza asumiera decisiones al azar o, en su efecto, alejadas de leyes precisas más generales.

La hipótesis de que los agujeros negros contienen una entropía y que, además, esta es finita, requiere para ser consecuente que tales agujeros emitan radiaciones térmicas, lo que al principio parece increíble. La explicación es que la radiación emitida escapa del agujero negro, de una región de la que el observador exterior no conoce más que su masa, su momento angular y su carga eléctrica. Eso significa que son igualmente probables todas las combinaciones o configuraciones de radiaciones de partículas que tengan energía, momento angular y carga eléctrica iguales. Son muchas las posibilidades de entes, si se quiere hasta de los más exóticos, que pueden ser emitidos por un agujero negro, pero ello corresponde a un número reducido de configuraciones. El número mayor de configuraciones corresponde con mucho a una emisión con un espectro que es casi térmico.

A pesar de que existen explicaciones intuitivas del comportamiento de un agujero negro, en cosmología teórica no existe una definición simple de qué constituye un agujero negro, y todos los teóricos trabajan con definiciones topológicas sofisticadas de qué constituye un agujero negro. De hecho en un espacio-tiempo compacto no hay una manera adecuada y general de definir qué condiciones debe cumplir una región para ser considerada un agujero negro. En espacio-tiempos no compactos se requieren algunas condiciones técnicas para decidir si una región es un agujero negro, así se dice que en un espacio-tiempo asintóticamente plano y predecible (que contiene una hipersuperficie de Cauchy que satisface ciertos requisitos), se dice que hay una región de agujero negro si el pasado causal de la hipersuperficie de tipo luz situada en el infinito futuro no contiene a todo el espacio-tiempo (eso significa que dicha hipersuperficie es inalcanzable desde algunos puntos del espacio tiempo, precisamente aquellos contenidos en el área de agujero negro). La frontera del pasado causal de la hipersuperficie de tipo luz futura es el horizonte de eventos.

Los agujeros negros contienen toda la masa de la estrella en un punto matemático, que es lo que se conoce como singularidad. Einstein nunca aceptó eso, sino que pensaba que la masa debería ocupar una región finita aunque fuera pequeña y por eso se opuso a la existencia de agujeros negros,⁹ que nadie llamaba así entonces, se conocían como "singularidades de Schwarzschild".) El nombre de "black hole" lo propuso (10 años después de la muerte de Einstein) el físico americano Wheeler.

Existen resultados matemáticos sólidos bajo los cuales una teoría métrica de la gravitación (como la relatividad general) predice la formación de agujeros negros. Estos resultados se conocen como teoremas de singularidades que predicen la ocurrencia de singularidades espaciotemporales (y si se acepta la hipótesis de censura cósmica, por tanto a la formación de agujeros negros). Las ecuaciones de campo de Einstein para la relatividad general admiten situaciones para las cuales se cumplen las condiciones de ocurrencia de singularidades y por tanto, los teoremas de singularidad muestran que los agujeros negros son posibles dentro de la relatividad general.

Se explican los fenómenos físicos mediante dos teorías en cierto modo contrapuestas y basadas en principios incompatibles: la mecánica cuántica, que explica la naturaleza de «lo muy pequeño», donde predomina el caos y la estadística y admite casos de evolución temporal no determinista, y la relatividad general, que explica la naturaleza de «lo muy pesado» y que afirma que en todo

momento se puede saber con exactitud dónde está un cuerpo, siendo esta teoría totalmente determinista. Ambas teorías están experimentalmente confirmadas pero, al intentar explicar la naturaleza de un agujero negro, es necesario discernir si se aplica la cuántica por ser algo muy pequeño o la relatividad por ser algo tan pesado. Está claro que hasta que no se disponga de una física más avanzada no se conseguirá explicar realmente la naturaleza de este fenómeno.

En 1995 un equipo de investigadores de la UCLA dirigido por Andrea Ghez demostró mediante simulación por ordenadores la posibilidad de la existencia de agujeros negros supermasivos en el núcleo de las galaxias. Tras estos cálculos mediante el sistema de óptica adaptativa se verificó que algo deformaba los rayos de luz emitidos desde el centro de nuestra galaxia (la Vía Láctea). Tal deformación se debe a un invisible agujero negro supermasivo que ha sido denominado Sgr.A (o Sagittarius A). En 2007-2008 se iniciaron una serie de experimentos de interferometría a partir de medidas de radiotelescopios para medir el tamaño del agujero negro supermasivo en el centro de la Vía Láctea, al que se le calcula una masa 4.5 millones de veces mayor que la del Sol y una distancia de 26 000 años luz (unos 255 000 billones de km respecto de la Tierra).¹² El agujero negro supermasivo del centro de nuestra galaxia actualmente sería poco activo ya que ha consumido gran parte de la materia bariónica, que se encuentra en la zona de su inmediato campo gravitatorio y emite grandes cantidades de radiación.

Por su parte, la astrofísica Feryal Özel ha explicado algunas características probables en torno a un agujero negro: cualquier cosa, incluido el espacio vacío, que entre en la fuerza de marea provocada por un agujero negro se aceleraría a extremada velocidad como en un vórtice y todo el tiempo dentro del área de atracción de un agujero negro se dirigiría hacia el mismo agujero negro.

En el presente se considera que, pese a la perspectiva destructiva que se tiene de los agujeros negros, estos al condensar en torno a sí materia sirven en parte a la constitución de las galaxias y a la formación de nuevas estrellas.

En junio de 2004 astrónomos descubrieron un agujero negro súper masivo, el Q0906+6930, en el centro de una galaxia distante a unos 12 700 millones de años luz. Esta observación indicó una rápida creación de agujeros negros súper masivos en el Universo joven.

La formación de micro agujeros negros en los aceleradores de partículas ha sido informada,¹³ pero no confirmada. Por ahora, no hay candidatos observados para ser agujeros negros primordiales.

El 11 de febrero de 2016, la colaboración LIGO anunció la primera de observación directa de ondas gravitatorias, generadas por la fusión de dos agujeros negros de masa estelar. Lo que supuso, además, la primera observación directa de dos agujeros negros fusionándose.⁶

dejando a un lado los agujeros negros supermasivos que suelen estar en el núcleo de las galaxias y cuya masa son de millones de veces nuestro Sol, el mayor agujero negro de masa estelar conocido hasta la fecha, se descubrió el año 2007 y fue denominado IC 10 X-1. Está en la galaxia enana IC 10 situada en la constelación de Casiopea, a una distancia de 1,8 millones de años luz (17 trillones de kilómetros) de la Tierra, con una masa de entre 24 y 33 veces la de nuestro Sol.¹⁴