



Un agujero negro es una región del espacio en cuyo interior la materia genera un campo gravitatorio tan intenso que ninguna partícula material, ni tampoco la luz, pueden escapar.

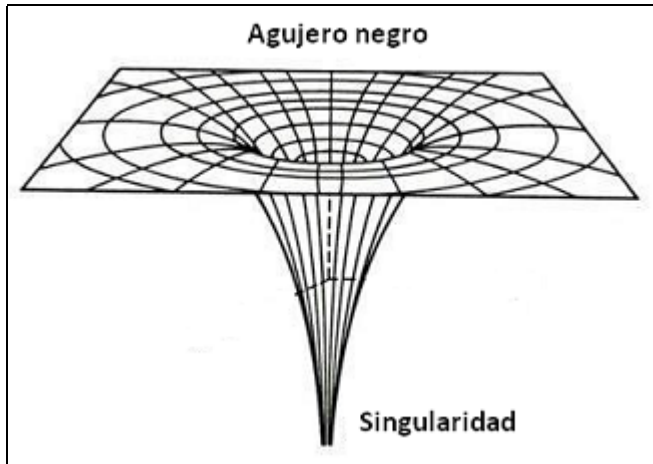
Los agujeros negros se forman por un proceso de colapso gravitatorio o desmoronamiento hacia adentro de un cuerpo celeste debido al efecto de su propia gravedad. En el centro la materia confluye hacia un punto llamado **singularidad**. La superficie esférica alrededor de una singularidad que limita la zona donde la materia y la energía ya no pueden escapar se denomina **horizonte de sucesos u horizonte de eventos**, porque los eventos a un lado de ella no pueden afectar a un observador situado al otro lado.



El agujero negro es oscuro, pero el plasma en torno al horizonte de sucesos se calienta a miles de millones de grados formando un **disco de acreción** brillante desde el que se pueden emitir chorros de fotones. Los agujeros negros pueden llegar a tener una masa de hasta diez mil millones de veces la de Sol concentrada en una región del espacio ridículamente pequeña y crecen engullendo estrellas o nubes de gas de su entorno o, cuando se produce una colisión entre galaxias, fusionándose con otros agujeros negros. Mientras el agujero negro está engullendo materia, emite hasta el 10% de ella en forma de radiación. Este es el método más eficiente que se conoce en la naturaleza de conversión de masa en energía.

La posibilidad de que existieran cuerpos que generan un campo gravitatorio tan intenso que ni siquiera la luz pueda escapar de ellos fue planteada en 1783 por [Michell \(1724-1793\)](#), apoyándose en el concepto de [velocidad de escape](#). Entonces, aún predominaba el modelo corpuscular de la luz, defendido por Newton. Pocos años después, en 1796, [Laplace \(1749-1827\)](#), continuador de la mecánica newtoniana, expuso la misma idea en las dos primeras ediciones de su libro *Exposition du Systeme du Monde*, aunque, al ganar terreno la [teoría ondulatoria de la luz](#) fue descartada en ediciones posteriores. En este contexto, el concepto tuvo poco recorrido ante la dificultad de

fundamentar cómo la luz, que no tiene masa, puede ser afectada por la gravedad.



Fue poco después de que Einstein formulara las ecuaciones de la Relatividad General (1915) cuando se pudo replantear la idea de una forma mucho más satisfactoria. Como hemos visto, esta teoría enseña que la materia curva el espacio-tiempo y provoca la deflexión de la luz, porque la luz, sin masa, también ha de cumplir el principio de equivalencia.

Por tanto, en este marco teórico, en lugar de plantear que la luz es atraída gravitatoriamente, decimos que los rayos luminosos siguen las trayectorias geodésicas del espacio-tiempo curvado. Cuando, tras un colapso gravitatorio, esta curvatura del espacio-tiempo confluye hacia una singularidad, las trayectorias geodésicas conducen indefectiblemente hacia ella a cualquier partícula material y también a cualquier fotón que se encuentre a menor distancia de la singularidad que un cierto valor límite.

Apenas unos meses después de la formulación de las ecuaciones de la Relatividad General, Schwarzschild (1873-1916) mostró que tenían soluciones exactas y obtuvo la primera de ellas. Forma parte de esta primera solución la fórmula adjunta, que calcula el llamado radio de Schwarzschild, R_S , o radio de una esfera dentro de la cual nada, ni la propia luz, puede escapar a la atracción gravitatoria de una masa M (en la ecuación, c es la velocidad de la luz y G es la constante de gravitación universal).

$$R_S = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$$

Resulta interesante ver que la fórmula del radio de Schwarzschild se puede obtener también partiendo de la ley de la velocidad de escape, v_e , simplemente sustituyendo la velocidad del cuerpo que no debe escapar por la velocidad de la luz ($v_e = c$) y despejando la distancia al centro de la materia de masa M :

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{r}} \quad \text{Si } v_e = c \rightarrow c = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{r}} \rightarrow r = R_S = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$$

Por lo que se refiere a la formación de los que luego serían llamados agujeros negros, fue Oppenheimer (1904-1967) quien primero predijo (en 1939) que una estrella masiva podría sufrir un colapso gravitatorio. No obstante, esta teoría no fue objeto de mucha atención hasta los años 60, posiblemente porque tras la Segunda Guerra Mundial los esfuerzos en investigación se dirigieron prioritariamente a la física atómica y nuclear.



En 1967 Hawking (1942-2018) y Penrose (1931-) ratificaron y ampliaron la predicción que había hecho Oppenheimer demostrando, a partir de las ecuaciones de Einstein, que en determinados casos no se podría impedir que una estrella terminara sufriendo un colapso gravitatorio completo. La idea tomó aún más fuerza con los avances que llevaron en esa época al descubrimiento de los púlsares y en 1969 se acuñó el término "agujero negro", después de que Wheeler (1911-2008) lo utilizara en una reunión de cosmólogos celebrada en Nueva York.

El trabajo de Penrose demostró rigurosamente que la formación de agujeros negros es una predicción robusta de la Teoría General de la Relatividad y se considera todavía como la mayor contribución en el campo de la Relatividad General desde Einstein. Por ello, Penrose ha sido galardonado con la mitad del Nobel de Física en 2020.

Conviene saber, por otra parte, que la solución que había encontrado Schwarzschild es aplicable únicamente al tipo de agujero negro más sencillo que cabe concebir, con simetría esférica y estático (agujero negro de Schwarzschild), y cuya configuración depende, por tanto, de un sólo parámetro: su masa M . La realidad es algo más compleja y para superar esta limitación, se modelizaron otros tipos de agujeros negros: El agujero negro de Kerr, en rotación (depende de dos parámetros: masa y momento angular); el agujero negro de Reissner-Nordström, con carga eléctrica y estático (depende también de dos parámetros: masa y carga) y el agujero negro de Kerr-Newman, con carga y en rotación (depende de los tres parámetros).

En cuanto a los órdenes de magnitud de la masa de los agujeros negros, se suele utilizar como referencia la masa del Sol. Así, los agujeros negros de mayor masa, que se llaman agujeros negros supermasivos, pueden tener varios millones de masas solares. Se sabe que existen en el corazón de muchas galaxias y se cree que se forman en el mismo proceso que da origen a los componentes esféricos de las galaxias. Por debajo de ellos están los agujeros negros de masa intermedia, cuya masa puede ser de 100 a un millón de masas solares, y, por debajo de estos, están los agujeros negros de masa estelar, que se forman cuando una estrella de más de 30-70 masas solares se convierte en supernova e implosiona. Finalmente, también se conciben micro agujeros negros, unos objetos hipotéticos algo más pequeños que los estelares. Son postulados por algunos enfoques de la gravedad cuántica, pero no se pueden generar en un proceso convencional de colapso gravitatorio, que requiere masas superiores a la del Sol.

Ya hemos dicho que los agujeros negros supermasivos están rodeados por un disco de acreción que, al sufrir los enormes efectos gravitatorios producidos por la gran masa central, va dejando caer

parte de su masa al abismo del agujero. La región de interacción entre el disco y el agujero es una zona tremendamente energética en la que se pueden originar grandes chorros de materia que se eyectan desde las zonas polares y donde se producen emisiones de muy alta energía en rayos X. El análisis detallado de esta radiación de rayos X permite pues investigar en detalle la estructura de la región más cercana al agujero negro.



En cuanto a la emisión de radiación por el agujero negro producida en el horizonte de sucesos, su existencia fue postulada por primera vez por Hawking en 1974, poco después de una visita a Moscú (en 1973), en la que los científicos rusos Zeldóvich y Starobinski le habían demostrado que, en virtud del [principio de incertidumbre de Heisenberg](#), los agujeros negros en rotación deberían crear y emitir partículas. De acuerdo con dicho principio, en el horizonte de sucesos de un agujero negro se pueden formar pares de partícula-antipartícula de corta duración, siendo probable que uno de los elementos del par caiga dentro del agujero de manera irreversible y el otro escape. De este modo el agujero disminuirá su masa para compensar la energía que se lleva el elemento del par que escapa de los aledaños del horizonte de sucesos. Como el par se forma estrictamente en el exterior del agujero negro, el proceso no contradice el hecho de que ninguna partícula material puede abandonar el interior. Esta radiación se llama **radiación de Hawking**.

Vamos ahora a hacer unos cálculos muy básicos para conocer órdenes de magnitud del tamaño y densidad de los agujeros negros. En unidades del Sistema Internacional, la velocidad de la luz es $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ y la constante de gravitación es $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ S.I.}$ Por tanto, el radio de Schwarzschild (en m) depende de la masa, M , del agujero negro, según dicta la siguiente expresión:

$$R_S = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2} = \frac{2 \cdot 6.67 \cdot 10^{-11}}{(3 \cdot 10^8)^2} \cdot M = 1.482 \cdot 10^{-27} \cdot M (m)$$

Al aplicarla se obtiene que un agujero negro de Schwarzschild, cuya masa sea igual a la masa del Sol ($1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$) tendrá un radio de unos 3 km . En cambio, un agujero negro supermasivo podrá tener

un radio de varios millones de *km*.

Igualmente se puede estimar también la densidad media que pueden tener los agujeros negros, mediante la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4 \cdot \pi \cdot R_S^3}{3}} = \frac{3}{4 \cdot \pi \cdot (1'482 \cdot 10^{-27} \cdot M)^3} \cdot M = \frac{7.33 \cdot 10^{79}}{M^2} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Al analizarla vemos que dicha la densidad media de los agujeros negros puede variar desde valores enormes hasta otros mucho más bajos, dependiendo de su masa. Así un agujero negro, cuya masa fuera igual a la masa del Sol, tendría una densidad enorme, del orden de la de un núcleo atómico; en cambio, un agujero negro supermasivo, cuya masa sea de unos de diez mil millones de masas solares, tendrá una densidad media como la del agua. En el centro de nuestra Galaxia existe un agujero negro supermasivo, denominado Sagitario A*, que tiene una masa de unos 4.6 millones de masas solares. Está a unos 26 000 años luz de distancia de la Tierra, su radio es, aproximadamente, de 12 millones de kilómetros (unos 40 segundos luz) y su densidad media es aproximadamente un millón de veces la del agua. Dentro de los agujeros negros supermasivos, este es relativamente pequeño y de ahí que su densidad media sea muy elevada. Podemos compararlo con el mayor que se conoce hasta el momento en el Universo, cuya masa es del orden de 40 000 millones de masas solares. Su tamaño es 10.000 veces más grande que el del agujero negro situado en el centro de la Vía Láctea y su densidad media es de tan sólo 0.01 kg/m³. Se estima que devora una masa equivalente a nuestro Sol cada dos días, lo que le hace crecer un 1% cada millón de años.



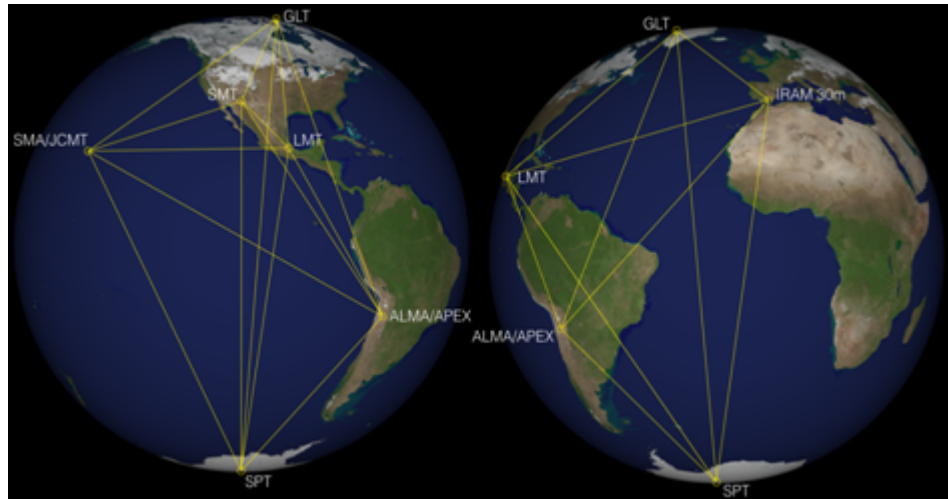
Andrea Ghez y Reinhard Genzel

El agujero negro situado en el centro de nuestra Galaxia, fue descubierto en la década de los 90 por los equipos de [Andrea Ghez \(1965- \)](#) y [Reinhard Genzel \(1952- \)](#). Usaron respectivamente los potentes telescopios ópticos de Mauna Kea (en Hawai) y del Observatorio Europeo Austral (en Chile) para estudiar durante años el movimiento de las estrellas situadas en el centro de la Vía Láctea y ambos demostraron que la alta velocidad de desplazamiento de dichas estrellas sólo podía deberse a la fuerza de atracción gravitatoria de una gran masa compacta invisible para los telescopios ópticos: el agujero negro supermasivo Sagitario A*. Fue a partir de este hallazgo, cuando se empezó a buscar agujeros negros en el centro de otras galaxias, y, como hemos dicho más arriba, hoy sabemos que la mayoría de ellas tienen ahí un agujero negro de este tipo. *Por descubrir un objeto compacto supermasivo en el centro de nuestra Galaxia*, se ha concedido a Ghez y Genzel la mitad del Nobel de Física de 2020 (como hemos comentado más arriba la otra

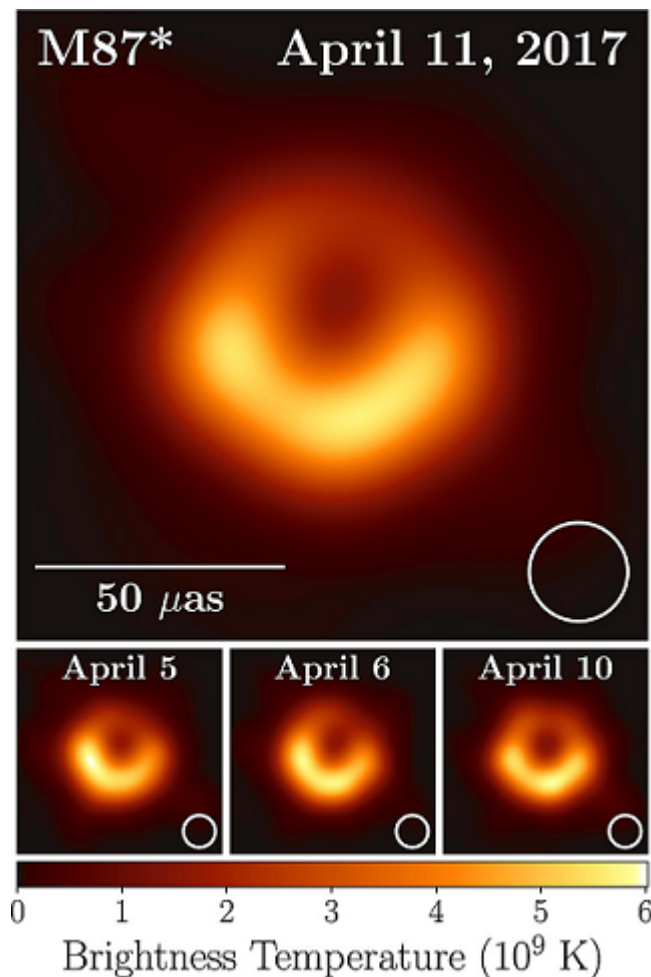
mitad se ha concedido a Penrose).

La investigación sobre los agujeros negros es uno de los mayores retos actuales de la Física. Concretamente Sagitario A* (al ser el más próximo a nosotros) es un magnífico "laboratorio" donde investigar toda una serie de fenómenos fascinantes tanto a nivel astrofísico como en el campo de la relatividad general y, por ello, La monitorización de este espectacular astro es una prioridad en todos los observatorios del mundo desde los que es visible, y las observaciones del mismo se realizan, noche tras noche, y en todas las longitudes de onda. A los avances que se van consiguiendo en los estudios de nuestro agujero negro, hemos de añadir las investigaciones realizadas sobre otros agujeros negros mucho más lejanos. En abril de 2019, se logró obtener la primera imagen directa de uno de ellos, del que se sabía que debía estar situado en el centro de la galaxia M87, a 44 millones de años-luz de la Tierra. Para darnos cuenta del gran hito histórico que supuso este logro, podemos empezar considerando que la observación se debe realizar en una zona del [espectro electromagnético](#) adecuada, para que la luz procedente del disco de acreción del agujero negro pueda sortear los obstáculos de gas y polvo que ha de atravesar en su viaje a la Tierra.

Teniendo esto en cuenta, se decidió realizar las observaciones con una longitud de onda del orden de un milímetro. Ahora bien, para obtener una imagen de un agujero negro tan lejano en esa longitud de onda con suficiente resolución, se necesitaría un radiotelescopio del tamaño de la Tierra. Para superar esta dificultad, se creó la red EHT (Event Horizon Telescope), que unifica datos de las antenas de ocho radiotelescopios



situados en EEUU (Submillimeter Telescope), Hawai (James Clerk Maxwell Telescope y Submillimeter Array), Méjico (Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano), Chile (Atacama Large Millimeter Array y Atacama Pathfinder Experiment), España (Observatorio IRAM 30m) y la Antartida (South Pole Telescope), y se usó el método de interferometría, que suma las imágenes obtenidas desde lugares alejados entre sí.



Esto resulta equivalente a haber utilizado un sólo receptor de gran tamaño. El proyecto echó a andar en 2014 y las observaciones sincronizadas que finalmente condujeron a la deseada imagen, se realizaron en abril de 2017. Para lograr dicha sincronización se usaron máseres de hidrógeno, que son relojes atómicos de muy alta precisión que graban el momento exacto y permiten saber qué ha grabado cada radiotelescopio en un mismo instante. A partir de aquí, el análisis de los datos y la construcción de la imagen final duró dos años y requirió el uso de un superordenador (cada radiotelescopio 350 terabytes y su señal se graba en un disco duro de alta capacidad). Además se aplicaron tres programas informáticos independientes de inteligencia artificial, cuya misión fue extrapolar datos que faltaban en las observaciones para obtener una finalmente una imagen de la que se pueda garantizar sin género de dudas que es fiel a la realidad.

La imagen obtenida finalmente en esta gran investigación cumplió sobradamente todas las expectativas y confirmó las predicciones que se habían formulado en el marco de la Relatividad General. Así, por ejemplo, podemos comentar que el anillo luminoso que rodea al horizonte de sucesos es asimétrico, porque el agujero negro está en rotación y ligeramente inclinado. En la región inferior la luz se está desplazando hacia el observador y aparece más brillante, mientras que en la parte superior la luz se aleja y aparece más tenue. Por otra parte, el horizonte de sucesos en torno al agujero negro es muy circular, como prevé la teoría. Con respecto al tamaño del agujero negro, también se confirmaron las predicciones, si bien

conviene saber que el radio del mismo llega hasta una distancia al centro menor que la que corresponde a la zona que se muestra oscura en la fotografía, ya que, las órbitas más próximas al horizonte zona de sucesos son inestables y, por ello, no visibles.

Este logro histórico es un eslabón más de una larga cadena de grandes avances recientes en el estudio de los agujeros negros, a los que se asocian muchos fenómenos sorprendentes.



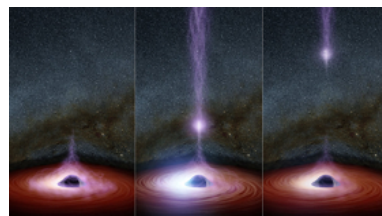
Recreación de la espaguetización de una estrella. ESO/M. Kommesser

Entre ellos, uno de los más llamativos es el conocido como "espaguetización", que puede ocurrir cerca de un campo gravitatorio muy intenso y muy inhomogéneo, como el que crea un agujero negro, cuando se aproxima una estrella. La fuerza que ejerce el campo gravitatorio creado por el agujero negro genera en el astro unas [fuerzas de marea](#) descomunales que lo deforman en sentido vertical, estirándolo y alargándolo como si fuese un espagueti. En estas condiciones, una parte del material de la estrella desgarrada no es devorado inmediatamente por el agujero negro, sino que queda atrapado en un disco rotante alrededor de él. El disco emite entonces una intensa radiación

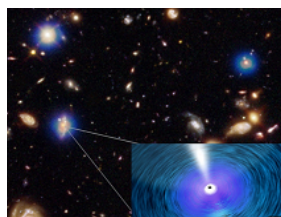
visible y de rayos X, y también ocasiona unos chorros en los que el material fluye, a velocidades próximas a la de la luz, en la dirección perpendicular.

Hace dos décadas que se vienen observando destellos luminosos que concuerdan con este fenómeno y se conocen como "eventos de disrupción por mareas" (en el argot astronómico, TDEs: tidal disruption events) y, en septiembre de 2019 se hicieron públicas las observaciones de un TED particularmente interesante, por tratarse del más cercano de los descubiertos hasta la fecha (a "tan solo" 215 años-luz de distancia de la Tierra). De su análisis se concluyó que la estrella desgarrada debía de ser similar a nuestro Sol, y que el agujero negro debe de ser un millón de veces más masivo.

Terminamos este apartado invitando a quienes estén interesados en saber detalles sobre algunas de las investigaciones más recientes relativas a los agujeros negros a consultar los siguientes artículos de divulgación, que viene publicando D. Rafael Bachiller (director del Observatorio Astronómico Nacional) en elmundo.es, y que también venimos .recogiendo en esta misma página Web dentro de la sección sobre [Divulgación de Astronomía](#).



Un agujero negro supermasivo hallado en una galaxia enana (9 de enero de 2011)



Una galaxia dominada por un agujero negro (12 de diciembre de 2012)



Un agujero negro supermasivo en rotación vertiginosa (6 de marzo de 2013)



El poder destructivo de un agujero negro supermasivo (8 de julio de 2014)



Un agujero negro supergigante dentro



de una galaxia liliputiense (25 de septiembre de 2014)

Una asombrosa

erupción de rayos X



en un agujero negro

(20 de noviembre de 2015)

El anillo que rodea



a un agujero negro supermasivo (18 de mayo de 2016)

Mil agujeros negros hallados en una



imagen de rayos X (18 de enero de 2017)

Un gran esfuerzo global persigue la



primera imagen de un agujero negro (22 de abril de 2017)

La desbocada



voracidad de los agujeros negros (21 de febrero de 2018)

El centro de la Via

Lactea podría



albergar miles de agujeros negros (15 de abril de 2018)

Los agujeros negros



prefieren vivir en parejas (8 de noviembre de 2018)



Presencian la espaguetización de una estrella

devorada por un

agujero

negro (25 de

octubre de 2020)

Hallado un agujero

negro ultramasivo a



distancia

record (2 de febrero

de 2021)

Un enjambre de



agujeros

negros (20 de

febrero de 2021)

Misteriosos

destellos del



agujero negro en el

centro de la Vía

Láctea (24 de abril

de 2021)

La pareja más

cercana de agujeros



negros

supermasivos (11 de

diciembre de 2021)
