

Agujeros negros,

los objetos más extraños y maravillosos del universo

Escrito por
Roberto de Arcia
robertodearcia@gmail.com

RESUMEN

Los agujeros negros son regiones muy especiales en el universo donde la gravedad es tan extrema que nada puede escapar. Aunque puede parecer una idea de ciencia ficción, en realidad son una consecuencia matemática de la relatividad general. Actualmente, contamos con evidencias directas e indirectas que además de confirmar su existencia nos permiten estudiar sus propiedades con precisión asombrosa. En este trabajo se presenta un recorrido general sobre el estudio de agujeros negros, se revisan los conceptos básicos de la teoría, se describe cómo se forman en la etapa final de las estrellas masivas y se examinan algunas de sus propiedades más notables.

Palabras clave: gravitation, agujeros negros, relatividad general.

ABSTRACT

Black holes are remarkable regions in the universe where gravity is so extreme that nothing can escape. Although they might seem like a science fiction idea, they are in fact a mathematical prediction of the field equations in the theory of general relativity. To this day, we have both direct and indirect evidence that confirms their existence and we can now study their main properties with increasing precision. This work provides a general overview of the study of black holes, from a review of the basic concepts of the theory and a description of how they form in the final stage of massive stars to an examination of some of their most notable properties.

Keywords: gravitation, black holes, general relativity.

INTRODUCCIÓN

Imagina que lanzas una pelota hacia arriba. El sentido común nos dice que mientras mayor sea la velocidad con la que la arrojes, mayor será la altura que alcance. En la mayoría de los casos, tarde o temprano la gravedad hará que regrese a tus manos o caiga al suelo. Sin embargo, bien podemos preguntarnos: ¿qué velocidad inicial debería tener la pelota para escapar definitivamente de la atracción terrestre? O visto de otra forma, ¿qué tan fuerte la tengo que arrojar para que ya no regrese? La respuesta es llamada velocidad de escape. Para el caso de la Tierra es de unos 11 km por segundo, lo que equivale a unas 40 veces la velocidad de un avión comercial.¹ En el Sol, mucho más grande

y masivo (su volumen es aproximadamente 1.3 millones de veces mayor que el de la Tierra), la velocidad de escape supera los 600 km por segundo. Dicho de otro modo, cualquier objeto que intentara abandonar nuestra estrella tendría que viajar a más de 2000 veces la velocidad de un avión comercial.

Ahora bien, ¿qué ocurriría si existiera un objeto con un campo gravitacional tan intenso que ni siquiera la luz pudiera escapar de él?² La idea no es nueva. Ya en el siglo XVIII, el geólogo inglés John Michell y el astrónomo francés Pierre-Simon Laplace se preguntaron qué podría ocurrir en una situación así. A estos objetos les llamaron estrellas oscuras. Es importante recordar que el análisis se llevó a cabo bajo la teoría de gravedad del científico inglés Isaac Newton. El concepto fue olvidado hasta 1915, cuando el físico alemán Albert Einstein formuló su teoría de la relatividad general, la cual cambió por completo la manera de entender al universo, pues ya no se ve a la gravedad como una fuerza que actúa a distancia y de manera instantánea, sino como la curvatura del espacio-tiempo causada por la presencia de masa y energía (Misner et al., 1973). Solo tuvo que pasar poco más de un mes para que el matemático alemán Karl Schwarzschild encontrara la primera solución exacta a estas ecuaciones, donde se describe una región del espacio-tiempo en la que esa curvatura se volvía extrema. La propuesta era tan extraña que incluso Einstein dudaba de su existencia física y durante décadas muchos la consideraron una rareza matemática sin relación con el mundo real (Thorne, 2001).

Afortunadamente, durante el siglo XX y lo que va del XXI se ha demostrado lo contrario. Hoy contamos con observaciones con una precisión impresionante: sistemas estelares con compañeros invisibles, estrellas que orbitan a gran velocidad alrededor de regiones supuestamente vacías, la detección de ondas gravitacionales en la Tierra y, finalmente, las imágenes directas de la sombra de un agujero negro (Event Horizon Telescope Collaboration, 2019). Sabemos con certeza que en el centro de la Vía Láctea existe un agujero negro con unos cuatro millones de masas solares, conocido como Sagitario A*. En otras galaxias se esconden colosos que llegan a concentrar miles de millones de soles en un volumen incluso menor que el de nuestro sistema solar.

¹ La velocidad promedio de un avión comercial es de 1000 km por hora.

² Recordemos que la velocidad de la luz en el vacío es aproximadamente 300 000 km por segundo.

Escrito por
Roberto de Arcia
robertodearcia@gmail.com



Figura 1. Diámetro de la Tierra, el Sol y el agujero negro supermasivo Sagitario A. [Imagen generada por IA.] (OpenAI, 2025).

DESARROLLO

¿Qué es un agujero negro?

Un agujero negro no es un “hueco” en el espacio, como podríamos imaginar, sino una región donde la gravedad es tan intensa que nada puede escapar. Aquí la clave está en cómo la materia y la energía deforman el espacio-tiempo. Si toda la masa del Sol se comprimiera en una esfera de apenas tres kilómetros de radio, la gravedad sería tan extrema que ni la luz podría salir. A ese límite lo llamamos horizonte de eventos. Es importante mencionar que no es una superficie sólida, sino una frontera invisible. Es decir, aunque no la podemos “ver” tal cual, sí podemos asegurar que todo aquello que la cruza ya no regresa. En el centro se encuentra la singularidad, un punto donde, según las matemáticas de la relatividad general, la densidad tiende al infinito (Hawking, 1998). En realidad, más que un “punto físico”, es una señal de que nuestra física no basta y necesitamos una nueva teoría que combine la relatividad con la mecánica cuántica.

Finalmente, conviene mencionar que, a pesar de lo exótico que puede sonar el concepto, los agujeros negros no son “aspiradoras cósmicas”. Es decir, no van a absorber de manera inevitable todo lo que está a su alrededor. Más bien, pensemos que si reemplazamos el Sol por un agujero negro de la misma masa, la Tierra seguiría orbitando como siempre. La diferencia estaría en la región cercana, ahí es donde la gravedad se vuelve monstruosa.

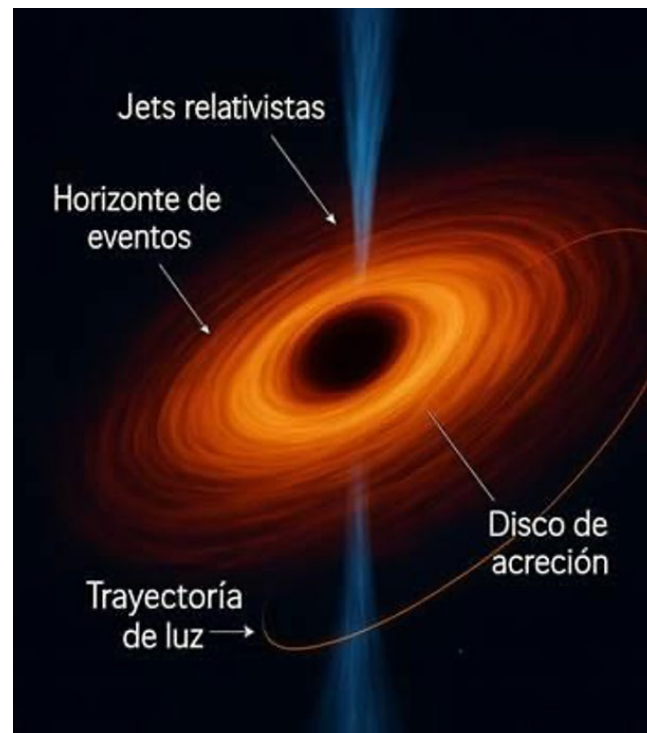


Figura 2. Agujero negro con horizonte de eventos, disco de acreción, jets relativistas y la forma en que la luz se curva al pasar cerca del agujero negro. [Imagen generada por IA.] (OpenAI, 2025).

El nacimiento de un agujero negro

Algo que tienen en común todas las estrellas del universo es que viven en equilibrio hidrostático. Es decir, la gravedad (fuerza que actúa para comprimirla) se compensa con la presión de radiación de las reacciones nucleares en su núcleo (fuerza que actúa para expandirla). El problema es que cuando el combustible se agota, la gravedad gana el juego y la estrella colapsará. A grandes rasgos, podemos predecir qué sucederá a partir de la llamada masa inicial de la estrella:

- *Estrellas pequeñas (como el Sol):* terminan en una enana blanca, densa pero estable. Podemos decir que una cucharadita de su contenido sería equivalente al peso de un elefante.
- *Estrellas medianas (8-20 masas solares):* explotan como supernovas y dejan estrellas de neutrones, tan compactas que una cucharadita de su materia pesaría tanto como una montaña.
- *Estrellas muy masivas (más de 20 soles):* colapsan de forma inevitable y dan lugar a un agujero negro estelar (Penrose, 2006).

Además de los agujeros negros estelares, existen los agujeros negros supermasivos con millones o miles de millones de masas solares. Están en el centro de casi todas las galaxias, incluida nuestra Vía Láctea. Su origen aún es un misterio, ya que no sabemos con certeza si estos crecieron poco a poco al fusionarse pequeños agujeros negros y devorar gas o nacieron siendo gigantes en el universo temprano.

Finalmente, algunos físicos han propuesto la existencia de los llamados agujeros negros primordiales, que se habrían formado en los primeros instantes después del Big Bang. En estos momentos, el universo era una sopa en donde las partículas y la radiación estaban unidas. Si existieron, estos objetos tendrían tamaños que van desde unos milímetros hasta miles de veces el radio del Sol. Aunque no tenemos pruebas directas de su presencia, se piensa que podrían explicar preguntas abiertas de la cosmología y la astrofísica. Un ejemplo es la materia oscura, esa sustancia invisible que constituye aproximadamente el 25 % del contenido del universo, pero cuya naturaleza aún desconocemos.

Si no podemos verlos, ¿cómo los detectamos?

Por definición, no podemos ver directamente un agujero negro porque la luz no puede escapar de él; lo que podemos hacer es detectarlos a través de los efectos que producen en su entorno.

- *Estrellas compañeras:* cuando vemos una estrella orbitando de manera “extraña” un objeto invisible, la explicación más coherente es que se trata de un agujero negro.
- *Discos de acreción:* el gas que cae hacia un agujero negro no lo hace en línea recta, sino girando y calentándose hasta millones de grados, emitiendo rayos X que detectamos con telescopios espaciales.
- *Ondas gravitacionales:* cuando dos agujeros negros se fusionan, generan vibraciones en el tejido mismo del espacio-tiempo. Estas ondas fueron detectadas por primera vez en 2015 gracias a dos experimentos realizados de manera independiente en Estados Unidos y Europa (LIGO Scientific Collaboration & Virgo Collaboration, 2016).
- *Fotografías directas:* en 2019, el Telescopio del Horizonte de Sucesos obtuvo la primera imagen de la sombra de un agujero negro en la galaxia M87, y en 2022 repitió la hazaña con Sagitario A* (Event Horizon Telescope Collaboration, 2019).



Figura 3. Comparación entre la primera imagen real de un agujero negro obtenida por el EHT y una ilustración artística. [Imagen generada por IA.] (OpenAI, 2025).

Agujeros negros en el universo

Hoy sabemos que casi todas las galaxias esconden un agujero negro supermasivo en su núcleo. En la Vía Láctea, Sagitario A* tiene unos cuatro millones de masas solares; en M87 encontramos uno con miles de millones. Ahora bien, lejos de ser objetos pasivos, estos gigantes moldean la evolución de sus galaxias. Pueden lanzar chorros de partículas que viajan casi a la velocidad de la luz, calentar el gas interestelar y regular la formación de estrellas. En cierto sentido, actúan como si fueran los “organizadores” cósmicos.

Uno de los grandes misterios es cómo lograron crecer tan rápido en el universo temprano. Telescopios como el James Webb han encontrado cuásares con agujeros negros gigantes cuando el cosmos tenía menos de mil millones de años. Resolver este enigma es fundamental para entender la historia del universo.

Misterios en el horizonte de la física

Los agujeros negros no solo fascinan a los astrónomos y astrofísicos, sino que se han convertido en uno de los mayores retos de la cosmología. Son el escenario donde nuestras teorías más exitosas (la relatividad general y la mecánica cuántica) dejan de ser compatibles, y por ello se vuelven auténticos laboratorios cósmicos.

- *La singularidad:* según las ecuaciones de Einstein, en el centro de un agujero negro la densidad se hace infinita y el espacio-tiempo se curva sin límite. No sabemos si esa "singularidad" existe como tal o si, en realidad, señala que la teoría necesita ser modificada. Resolver este problema nos llevaría a una nueva física.
- *La paradoja de la información:* el físico inglés Stephen Hawking demostró que los agujeros negros emiten radiación, lo que implica que podrían evaporarse con el tiempo. Pero, si desaparecen, ¿qué ocurre con la información de todo lo que cayó en su interior? La mecánica cuántica afirma que la información nunca se destruye, y sin embargo los agujeros negros parecen contradecir ese principio. Este debate sigue siendo uno de los más intensos en la física contemporánea.
- *Los distintos tipos de agujeros negros:* el modelo más simple de un agujero negro es el de Schwarzschild. En este caso tenemos una distribución de materia sin rotación ni carga eléctrica. Sin embargo, se supone que todos los objetos en el universo giran, y por eso el caso más realista es el de Kerr. Existe incluso una solución aún más extrema, el de Kerr-Newman, que añade carga eléctrica. Aunque tal vez estos últimos no existan en la naturaleza, su estudio matemático nos ayuda a probar los límites de la teoría de la relatividad.
- *Los agujeros de gusano:* las mismas ecuaciones que permiten los agujeros negros también admiten soluciones aún más exóticas: túneles que conectarían puntos lejanos del espacio-tiempo. Aunque no hay pruebas de que existan, los agujeros de gusano han sido una fuente inagotable de especulación científica y de inspiración cultural, desde propuestas de viajes interestelares hasta relatos de ciencia ficción.

En definitiva, los agujeros negros son mucho más que "devoradores de materia". Son ventanas hacia los límites de nuestro conocimiento. Cada avance en su comprensión nos acerca un poco más al objetivo final de la física: una teoría unificada que explique el universo desde lo más grande hasta lo más pequeño.

CONCLUSIONES

Los agujeros negros han pasado de ser vistos como rarezas matemáticas a convertirse en verdaderos protagonistas de la física teórica. Nos han mostrado que el universo es mucho más extraño, complejo y sorprendente de lo que imaginábamos. Hoy en día sabemos que hay regiones donde el tejido que forma el espacio-tiempo se estira hasta el límite y la materia se concentra en densidades enormes. Podemos demostrar que no son simples especulaciones, ya que hemos detectado su influencia en estrellas vecinas. Además, hemos desarrollado aparatos que nos permiten "escuchar" las ondas gravitacionales que producen al fusionarse y hasta fotografiar su sombra. Sin embargo, siguen siendo objetos rodeados de grandes misterios. ¿Qué ocurre en la singularidad?, ¿qué destino tiene la información?, ¿son acaso la clave para unir la relatividad y la mecánica cuántica? Hay muchas preguntas abiertas y, quizá, la clave para responderlas esté en una teoría cuántica de la gravedad.

REFERENCIAS

- Event Horizon Telescope Collaboration (2019). First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The shadow of the supermassive black hole. The Astrophysical Journal Letters, 875(1), L1. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7>
- Hawking, S. (1998). Historia del tiempo: Del big bang a los agujeros negros. Crítica.
- LIGO Scientific Collaboration & Virgo Collaboration (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. Physical Review Letters, 116(6), 061102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>
- Misner, C. W., Thorne, K. S. & Wheeler, J. A. (1973). Gravitation.
- Penrose, R. (2006). El camino a la realidad: Una guía completa a las leyes del universo. Debate.
- Thorne, K. S. (2001). Agujeros negros y tiempo curvo: El escandaloso legado de Einstein. Crítica.