

Este artículo apareció publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 1996. Su apariencia puede haber cambiado al ser reprocesado con pdflatex y nuevos ficheros de estilo.

## VIAJE A UN AGUJERO NEGRO Pablo de Vicente Abad

*Centro Astronómico de Yebes*  
Instituto Geográfico Nacional

Una de las preguntas más habituales que el público plantea a los astrónomos es sobre la identidad y el origen de los agujeros negros. Los agujeros negros provocan una fascinación generalizada quizá debida a su rareza, a sus temibles propiedades o al extravagante papel que le han otorgado algunas personas como puertas a otros mundos/universos.

El término **agujero negro** fue inventado por el físico relativista J.A. Wheeler en 1967 para describir un objeto con un campo gravitatorio tan intenso que nada, ni siquiera la luz que emite, puede escapar de él. Esta situación se produce en cuerpos de una cierta masa y tamaño.

En física se denomina velocidad de escape a aquella que debe tener un objeto para escapar del campo gravitatorio de otro. Por ejemplo, la velocidad inicial de un cohete para vencer la fuerza de la gravedad de la Tierra y escapar al infinito es de 11 km/s. Si el cohete tuviese que despegar de un planeta del mismo radio que la Tierra pero con una masa cuatro veces superior la velocidad debería ser el doble; sin embargo si su radio fuese la cuarta parte del de la Tierra la velocidad de despegue sería la misma que la de la Tierra. La velocidad de despegue de un planeta o una estrella está directamente relacionada con el tamaño y la masa de éste. En particular el cuadrado de la velocidad es directamente proporcional a la masa del planeta (o de la estrella) e inversamente proporcional a su radio. Así, si conocemos dos de estos parámetros podemos calcular el tercero. En la tabla adjunta se puede observar las velocidades de escape para diferentes planetas del sistema solar. Veamos cómo nos podemos servir de esta relación para conocer el “tamaño” de un agujero negro.

Un agujero negro es un objeto cuya masa y radio son tales que la velocidad de despegue es la velocidad de la luz. Por tanto conocida ésta y su masa se puede calcular el tamaño de la “estrella”. El radio que se obtiene se denomina Radio de Schwarzschild y corresponde aproximadamente a 3 km por cada masa solar. Para transformar nuestro sol en un agujero negro habría que comprimirlo desde su tamaño actual (700.000 km de radio) hasta 3 km de radio. Las densidades en esta región serían formidables. Es como si tratáramos de meter toda la masa del sol en un astro del tamaño de un pueblo.

Por tanto, en un agujero negro la densidad de materia puede ser extremadamente elevada, superior a la de una estrella de neutrones, uno de los objetos más densos que se conocen en el Universo.

Planeta	Velocidad de escape	
	(km/s)	(km/h)
Mercurio	4,25	15 300
Venus	10,36	37 300
Tierra	11,18	40 200
Marte	5,02	18 100
Júpiter	59,54	214 300
Saturno	35,48	127 700
Urano	21,29	76 700
Neptuno	23,48	84 500
Plutón	1,27 ?	4 600 ?

## Las proximidades de los agujeros negros

Las fascinantes propiedades de los agujeros negros se pueden observar en su proximidad y se deben a su intenso campo gravitatorio, que deforma el espacio-tiempo alrededor de ellos.

El campo gravitatorio en física clásica se describe a partir de la mecánica newtoniana. Por ejemplo, las leyes de Kepler, que forman parte de la mecánica newtoniana, predicen que los planetas se mueven alrededor del Sol en órbitas elípticas y que el cuadrado del periodo es proporcional al cubo de la distancia promedio al Sol. En física, el espacio y el tiempo son variables que sirven para determinar la posición de un suceso, es decir, el cuándo y el dónde se produce algo. La mecánica newtoniana, de acuerdo con nuestro sentido común, considera que estas variables son independientes de los objetos que existen, es decir los objetos existen en un cierto espacio que podríamos considerar cuadrículado y en un cierto tiempo, que permea todo el Universo y estaría regido por un gran "Reloj Universal".

En 1920, Einstein introdujo una nueva teoría que describe la influencia de los cuerpos masivos en el espacio-tiempo y en la que el espacio y el tiempo son interdependientes y se deforman por la presencia de aquéllos. Esta teoría, denominada Relatividad General, es más amplia que la mecánica newtoniana y se reduce a ella cuando las masas son muy pequeñas. Sin

embargo, en presencia de cuerpos muy masivos, como por ejemplo los agujeros negros, predice efectos que resultan increíbles para nuestros sentidos.

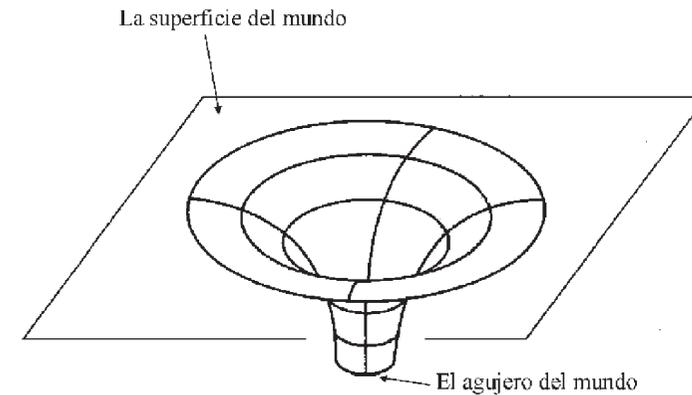


Figura 1: Región de la superficie del mundo donde habitan los seres planos. El plano en esta región se hunde hasta romperse. Esa zona se conoce como el agujero del mundo.

## Una expedición a las cercanías de un agujero negro

Sumerjémonos en una parábola mitológica que nos ejemplifique algunas de las propiedades del entorno de un agujero negro. Supongamos que somos "dioses" para los seres de un mundo de dos dimensiones y que podemos observar su historia desde fuera de su plano de existencia. Nuestra divinidad procede del hecho de que nosotros somos seres de tres dimensiones. Nuestros "súbditos", de dos dimensiones, conocen la geometría euclidiana y saben que, en virtud de ésta, la longitud de una circunferencia es igual a  $\pi$  veces el diámetro. Lo que no saben es que ésto es cierto porque viven en una región plana de la superficie de su mundo. Un día un grupo de estos seres decide aventurarse en una región donde la leyenda dice que existe un agujero en el mundo y donde se perciben fenómenos extraños. En particular han oído comentar que la geometría euclidiana no funciona allí. Desde nuestra posición privilegiada sabemos que en dicha región la superficie deja de ser plana y se hunde, como si fuera de goma y la hubieran estirado, formando una especie de embudo que acaba en un agujero de unos 3 km de radio.

Este es el “agujero” del que han oído hablar los seres planos. La expedición de los seres planos sabe que dicha región se puede bordear para pasar al otro lado pero no sabe que ocurre si uno se encamina directo hacia su centro. También saben que las rarezas de la región comienzan cuando la geometría euclidiana deja de funcionar. Así que de momento se quedan a una distancia de seguridad donde montan el campamento base y saben que su mundo es “normal” (es decir donde nosotros sabemos que la superficie es plana). Uno de los objetivos de la expedición consiste en determinar la distancia al agujero para tomar precauciones. Para ello utilizan la mejor tecnología de que disponen. Un grupo se dirige al otro lado del “agujero” rodeando éste y a una gran distancia de él (la geometría euclidiana todavía funciona en las inmediaciones). Llevan consigo un espejo. En este lado queda otro grupo con un láser, un detector de luz y un reloj extraordinariamente preciso. La idea consiste en enviar un haz de luz desde un extremo al otro que pase por el centro del “agujero” y que se refleje en el espejo y vuelva por el mismo camino. El tiempo que tarda el haz en ir y volver multiplicado por la velocidad de la luz es el doble de la distancia que separa ambos grupos. Si ambos están situados simétricamente respecto del agujero la cuarta parte del valor será la distancia que les separa del centro del “agujero”. Tras un cierto tiempo la expedición descubre que este procedimiento no funciona. La luz se dirige hacia el centro del “agujero”

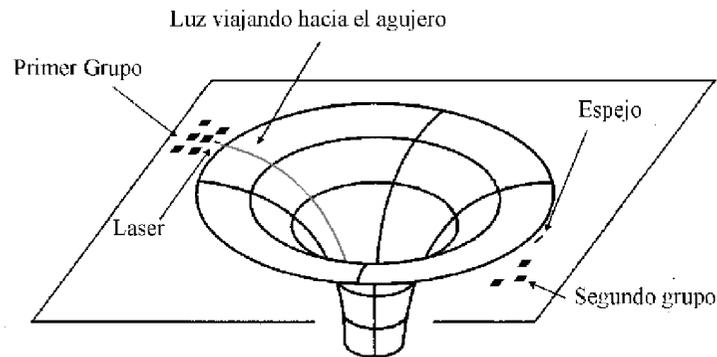


Figura 2: Expedición de seres planos a la región del agujero del mundo. Los dos grupos de seres planos están representados por cuadradas oscuras. Uno de los grupos envía un haz de luz al otro grupo a través del agujero. La luz se desplaza por la superficie del mundo y es engullida por el agujero. Por el otro extremo no emerge nada.

pero nunca emerge de él por el otro lado. Es como si el “agujero” se tragara la luz. No se ve nada a través de él. Desde nuestra posición privilegiada observamos como el pincel de luz sale del láser y se dirige hacia el agujero deslizándose por la superficie del mundo hasta llegar al borde del “agujero” donde desaparece, pues ya no queda superficie por la que viajar.

Deciden hacer otra prueba para comprobar que efectivamente el “agujero” es opaco, es decir es negro. Para ello encienden una bombilla que genera luz en todas las direcciones, en vez de en una dirección determinada como ocurría con el láser. En el otro lado se produce una conmoción, en la dirección del agujero no se ve nada pero han aparecido dos luces a ambos lados del “agujero” que parecen una la imagen especular de la otra. ¡Este lugar es realmente extraño!. Desde nuestra posición observamos que la luz de la bombilla sigue una trayectoria, pegada siempre a la superficie del mundo, que bordea el “agujero” y emerge a ambos lados de él. Los observadores del espejo creen que existen dos fuentes de luz diferentes y simétricamente colocadas respecto del agujero. El agujero funciona como una lente.

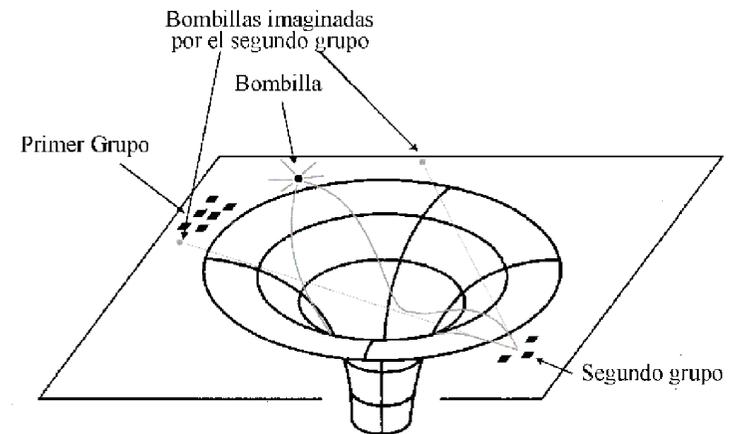


Figura 3: Uno de los grupos de seres planos enciende una bombilla. La luz se propaga en todas las direcciones pero sólo dos rayos llegan al segundo grupo. El segundo grupo cree (líneas finas grises) que hay dos bombillas situadas a los lados del agujero.

En vista de que la primera prueba para determinar la distancia al centro del “agujero” ha resultado fallida la expedición opta por un método tradicional pero seguro. De momento estimarán la distancia dando una vuelta

completa en torno al “agujero”. En la primera vuelta miden una longitud de unos 176 km, es decir la expedición se encuentra a una distancia de 28 km del centro. El grupo de seres planos decide acercarse 7,47 km hacia su centro. Nuevamente dan una vuelta y descubren que la circunferencia tiene una longitud de 132 km, que corresponde a una distancia de 21 km del centro. ¡Pero eso no puede ser!, deberían estar a 20,53 km del centro. El misterio se acrecienta y la expedición se aproxima ahora 7,7 km más hacia el centro. Han recorrido 15,17 km desde el campamento base y deberían estar a 12,83 km del centro. El “agujero” que es negro aparece más grande en su horizonte de visión. Dan una vuelta más. La longitud que miden es de 88 km que corresponde a una distancia de 14 km respecto del centro. La expedición comienza a sentirse preocupada porque observan que las distancias parecen hacerse más largas a medida que se acercan al agujero.

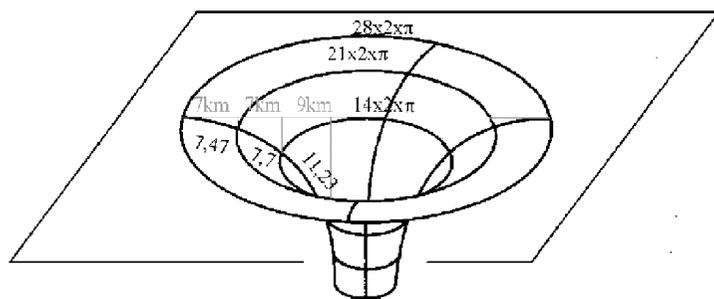


Figura 4: Recorridos realizados por la expedición de seres planos. Se ha marcado la longitud de cada circunferencia y los avances radiales hacia el centro del agujero. Obsérvese que las distancias recorridas a lo largo del embudo son más largas que si el desplazamiento se produjese por una superficie totalmente plana, donde A es el resultado de la combinación de B y C.

Para nosotros la situación es obvia: los seres planos están bajando por la superficie del embudo, acercándose al agujero y dando vueltas en torno a él, mientras piensan que se mueven por su acostumbrada región plana de la superficie del mundo donde las distancias serían más cortas. La expedición decide acercarse ahora 11,23 km más, es decir han recorrido 26,39 km respecto del campamento base. La leyenda dice que el “agujero” tiene 3 km de radio así que esa aproximación les haría caer en él. Sin embargo descubren que todavía se encuentran en la superficie del mundo. Por tanto dan una vuelta completa y descubren que la circunferencia mide

31,4 km, es decir, están a 5 km del centro del agujero y a 2 km de su borde. Ciertamente la geometría euclidiana no funciona en este lugar tan extraño. ¡Es mejor no seguir avanzando!.

El “agujero” del mundo plano es el equivalente del agujero negro en nuestro universo. Como vemos, el espacio entorne al agujero se deforma, la superficie se estira hasta dar lugar a un embudo que se rompe en lo que se denomina el horizonte de sucesos. El horizonte de sucesos marca la frontera en el espacio-tiempo entre el agujero negro y su exterior. El tiempo también se deforma en las cercanías de un agujero negro. Un observador plano que no se hubiera aventurado con la expedición hacia el “agujero” observaría como ésta tarda un tiempo infinito en acercarse al centro. Esta sensación no la tienen los miembros de la expedición que se acercan a él, que cronometran un tiempo determinado hasta llegar al borde.

Esta pequeña historia, muy simplificada, nos ha mostrado como el espacio y el tiempo cambian en las proximidades de un agujero negro.

## Las fuerzas de marea

Sin embargo las circunstancias en un caso real serían aún más dramáticas. Como sabemos, la atracción gravitatoria entre dos cuerpos es directamente proporcional a su masa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. En las cercanías de los agujeros negros la gravedad es tan intensa que la atracción del agujero negro sobre un cuerpo extenso es mucho mayor en la parte más cercana que en la más alejada. Este fenómeno se conoce con el nombre de fuerza de marea, y recibe dicho nombre porque es el responsable de las mareas en los océanos de la Tierra. Las mareas están producidas por la atracción gravitatoria de la Luna. La Luna atrae con más fuerza la parte de la Tierra más próxima a ella y con menor fuerza la más lejana a ella. Es decir, la Tierra se deforma como un huevo. El nivel del agua en la Tierra crece hacia la Luna en su lado más próximo a ésta y se aleja de ella en las antípodas; es la pleamar. Mientras, en una posición distante noventa grados y doscientos setenta grados en longitud, el nivel del agua es el más bajo; es la bajamar. En el caso de los agujeros negros la gravedad es tan intensa que las fuerzas de marea pueden romper los objetos extensos. Por tanto una nave espacial que se aventurara en las cercanías de un agujero negro sería despedazada en trozos más y más pequeños a medida que se acercaran a su superficie.

Los restos de estrellas despedazadas por la acción gravitatoria de un agujero negro y el material interestelar cercano caen a su interior a velocidades próximas a las de la luz, siguiendo una trayectoria espiral. La ma-

tería en su caída se acumula en una región achatada con forma de disco. Dichos discos se conocen con el nombre de discos de acreción. Dado que la velocidad de caída es formidable, el rozamiento que sufre la materia en el disco es muy alto y hace que ésta se caliente hasta temperaturas muy elevadas. Cuando la materia se calienta emite radiación. Precisamente esto es lo que ocurre con el disco de acreción. La parte más interna, que está más caliente, emite en rayos X mientras que la externa, más fría, emite en radio. Esta radiación se puede observar desde larga distancia y es como un faro que advierte del peligro de aproximarse a una región tan violenta.

Como vemos el viaje a un agujero negro es un suicidio seguro.

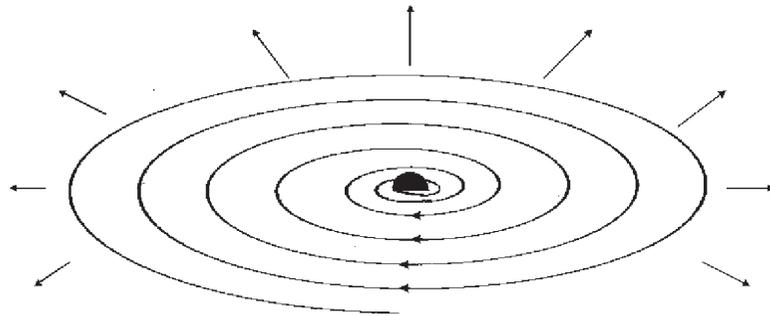


Figura 5: Disco de acreción. La materia cae hacia un agujero negro siguiendo una trayectoria espiral. La materia se acumula en un disco y por rozamiento se calienta y radía como un faro.

## Cómo se forma un agujero negro

La formación de un agujero negro está asociada al colapso y muerte de una estrella. La vida de las estrellas es una lucha constante entre la presión térmica, que tiende a expandir la estrella, y la gravedad, que tiende a colapsarla. El generador de presión térmica es el calor producido por las reacciones nucleares. Cuando el combustible para estas reacciones se agota, la estrella llega a su final. Este puede presentarse de varias formas, dependiendo de la masa de la estrella. El final puede ser violento o tranquilo. Si es violento, y se produce una explosión tal que no queda nada, la presión térmica habrá vencido a la gravedad, ya que el material se ha dispersado. Si lo que queda es un agujero negro, la gravedad habrá

vencido a la presión térmica, ya que la materia que formaba la estrella habrá colapsado en un pequeña región del espacio.

## Conclusión

La influencia de los agujeros negros en la trayectoria de la luz que pasa cerca de ellos y el tipo de radiación que emite la materia cuando cae a su interior son dos buenas pistas para su localización. El primer caso se conoce como lente gravitacional. Supongamos que detrás de un agujero negro hay una galaxia brillante. Como la luz de la galaxia no puede pasar a través de él debe bordearlo, produciendo imágenes múltiples e iguales de ella en torno a la posición del agujero negro. Existen varios posibles agujeros negros que se han descubierto en nuestra galaxia de esta manera.

Por otra parte algunos objetos brillantes en rayos X son también candidatos a agujeros negros. En ambos casos se trata de estimar la influencia gravitatoria que producen en las estrellas cercanas y en el medio interestelar para saber si ciertamente son agujeros negros.