



www.astrosociety.org/uitc

No. 24 - Summer 1993

© 1993, Astronomical Society of the Pacific, 390 Ashton Avenue, San Francisco, CA 94112.

Agujeros Negros

por John Percy, University of Toronto

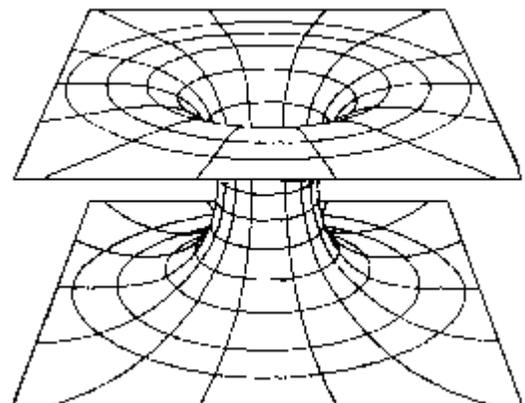
La gravedad es la partera y el enterrador de las estrellas. Reúne puñados de gas y polvo de las nubes interestelares, los comprime y, si son suficientemente masivos, enciende las reacciones termonucleares en su interior. Luego, durante millones o miles de millones de años, se producen energía, calor y presión que puede balancear la atracción de la gravedad. La estrella permanece estable, como nuestro Sol. Sin embargo, cuando las fuentes de energía de la estrella finalmente se agotan, la gravedad hace que se contraiga sin que nada se lo impida. Las estrellas como nuestro Sol se contraen para convertirse en enanas blancas --- un millón de veces más densas que el agua, soportadas por fuerzas cuánticas entre los electrones. Si la masa de la estrella que colapsa es de más de 1.44 masas solares, la gravedad domina a las fuerzas cuánticas, y la estrella sigue colapsando para convertirse en una estrella de neutrones, millones de veces más densa que una enana blanca, y soportada por fuerzas cuánticas entre neutrones. La energía liberada en este colapso expulsa las capas exteriores de la estrella, produciendo una supernova. Si la masa de la estrella que colapsa es de más de tres masas solares, sin embargo, ninguna fuerza puede impedir que colapse completamente para convertirse en un agujero negro.

- [¿Qué es un agujero negro?](#)
- [Mini agujeros negros](#)
- [¿Cómo puede usted "ver" un agujero negro?](#)
- [Agujeros negros supermasivos](#)
- [Agujeros negros y ciencia ficción](#)
- [Actividad #1: Contracción](#)
- [Actividad #2: Un Modelo a Escala de un Agujero Negro](#)
- [Mitos sobre agujeros negros](#)
- [Lecturas Adicionales sobre Agujeros Negros](#)

¿Qué es un agujero negro?

Un agujero negro es una región del espacio en la que la atracción de la gravedad es tan fuerte que nada puede escapar. Es un "agujero" en el sentido de que las cosas pueden caer, pero no salir de él. Es "negro" en el sentido de que ni siquiera la luz puede escapar. Otra forma de decirlo es que un agujero negro es un objeto para el que la velocidad de escape (la velocidad requerida para desligarse de él) es mayor que la velocidad de la luz -- el último "límite de velocidad" en el universo.

En 1783 un astrónomo aficionado británico, el Rev. John Mitchell, se dió cuenta de que las leyes de gravitación y movimiento de Newton implicaban que mientras más masivo es un cuerpo, mayor es la velocidad de escape. Si usted pudiera de alguna



manera hacer algo unas 500 veces mayor que el Sol, pero con la misma densidad, razón, ni siquiera la luz podría moverse lo suficientemente rápido para escapar y ese "algo" nunca sería visto. Pero los astrónomos y físicos necesitaron la teoría de la relatividad general de Einstein, que es la teoría moderna de la gravedad, para entender la verdadera naturaleza y las características de los agujeros negros.

La frontera de un agujero negro se llama *horizonte de eventos*, porque cualquier evento que suceda en su interior está oculto para siempre para alguien que mira desde fuera. El astrónomo Karl Schwarzschild demostró que el radio del horizonte de eventos en kilómetros es 3 veces la masa expresada en masas solares; a éste radio se le llama radio de Schwarzschild. El horizonte de eventos es un filtro unidireccional en el agujero negro: cualquier cosa puede entrar, pero nada puede salir.

Un agujero negro es un objeto muy simple: tiene sólo tres propiedades, masa, espín y carga eléctrica. Debido a la manera en la que los agujeros negros se forman, su carga eléctrica es probablemente cero, lo que los hace aún más simples. La forma de la materia en un agujero negro no se conoce, en parte porque está oculta para el universo externo, y en parte porque, en teoría, la materia continuaría colapsando hasta tener radio cero, un punto al que los matemáticos llaman una singularidad, de densidad infinita ---algo con lo que no tenemos experiencia aquí en la Tierra.

En teoría, los agujeros negros vienen en tres tamaños: pequeños ("mini"), medianos y grandes ("supermasivos"). Hay buena evidencia de que los agujeros negros de tamaño mediano se forman como despojos de estrellas masivas que colapsan al final de sus vidas, y de que existen agujeros negros supermasivos en los núcleos de muchas galaxias --- quizá incluyendo la nuestra.

Mini Agujeros Negros

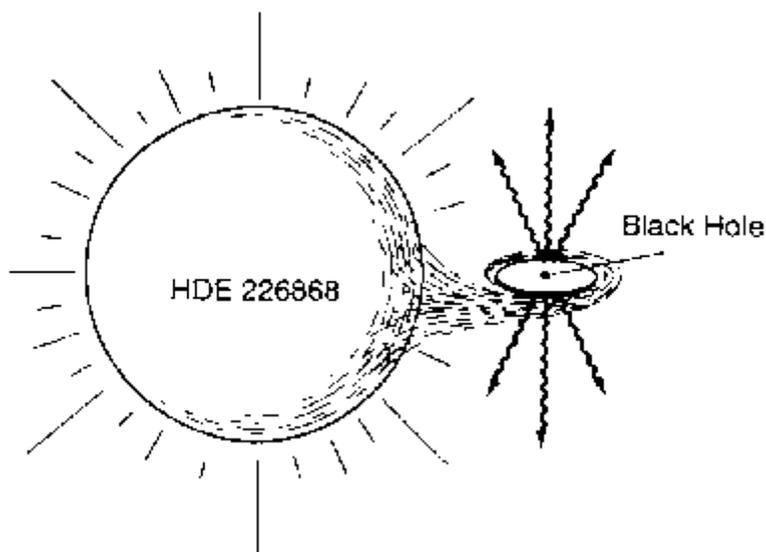
Un agujero negro con masa menor de tres masas solares no se formaría solo; su gravedad es demasiado débil para causar el colapso sobre sí mismo. Una enorme presión externa se necesitaría para crear un "mini-agujero negro." En 1971, el astrofísico Stephen Hawking teorizó que, en la densa turbulencia de la gran explosión de la que surgió el universo, esas enormes presiones externas existieron y formaron muchos mini-agujeros negros. Estos serían tan masivos como una montaña, pero tan pequeños como los protones de los que los átomos están hechos. Y tendrían otra propiedad extraña: como resultado de las leyes de la mecánica cuántica que gobiernan las partículas muy pequeñas en el universo, radiarían energía espontáneamente y, después de miles de millones de años, eventualmente se evaporarían en una violenta explosión final. Por tanto, los mini-agujeros negros pueden no ser "negros" del todo --- una posibilidad intrigante. No existe evidencia observacional de mini-agujeros negros pero, en principio, tales objetos podrían estar dispersos por el universo, quizá aún cerca de nuestro sistema solar.



Agujeros Negros

¿Cómo puede usted "ver" un agujero negro?

Usted podría preguntarse cómo se puede encontrar un agujero negro si nada, incluyendo la luz, puede escapar de él. Los agujeros negros tienen masa, que produce una fuerza gravitacional que afecta a los objetos cercanos. Esta fuerza gravitacional sería muy intensa cerca del agujero negro, y podría tener efectos notables en su ambiente. El material que cae hacia el hoyo negro ganaría energía del campo gravitacional, y sería aplastado y calentado al tratar de colarse en la pequeña garganta del agujero negro, por lo que produciría rayos-X. El primer ejemplo de un agujero negro fue descubierto precisamente por ese efecto gravitacional en una estrella acompañante.



La concepción de una artista del sistema Cygnus X-1. HDE 226868 es una estrella supergigante azul masiva; se cree que su compañera es un agujero negro, rodeado por un disco de acreción de gases de HDE 226868 que están cayendo en espiral hacia el agujero negro. La estrella y el agujero negro están en órbita el uno alrededor del otro. La existencia del agujero negro fue deducida del movimiento orbital de la estrella, y de los rayos X producidos por los gases en el disco de acreción que se calientan conforme caen hacia el agujero negro. (Cortesía de William J. Kaufmann III, Universe, W.H. Freeman & Company, 1991. Usado con permiso.)

Cygnus X-1 es el nombre que se le dió a una fuente de rayos X en la constelación Cygnus, descubierta en 1962 con un primitivo telescopio de rayos X que se envió a bordo de un cohete. Para 1971, la localización de la fuente de rayos X en el cielo se había medido con mayor precisión, usando observaciones de cohete y satélite. Un avance fundamental se dió en marzo de 1971, cuando una nueva fuente de ondas de radio se descubrió en Cygnus, cerca de la posición de la fuente de rayos X. La señal de radio variaba exactamente al mismo tiempo que la intensidad de rayos X, una fuerte evidencia de que la fuente de radio y la de rayos X eran el mismo objeto.

Una estrella débil llamada HDE 226868 aparece en la posición de esta fuente de radio. Los astrónomos que estudiaban la luz de HDE 226868 habían encontrado dos hechos importantes: (1) HDE 226868 es una estrella supergigante azul -- una estrella normal, masiva, cerca del final de su vida; y (2) la estrella gira alrededor de otro objeto masivo en una órbita con período de 5.6 días.

Conociendo la fuerza necesaria para mantener a HDE 226868 en órbita, se puede calcular la masa de la compañera -- es de cerca de 10 masas solares. Pero no hay signos de luz visible de ella -- y algo en el objeto produce rayos X. La explicación o "modelo" que mejor se ajusta a estos hechos es que la compañera es un agujero negro de cerca de 10 masas solares -- el cadáver de una estrella masiva que alguna vez fue la compañera de HDE 226868. Los rayos X son producidos conforme el gas de la atmósfera de la supergigante azul cae hacia el objeto colapsado y se calienta. El objeto colapsado no puede ser una enana blanca o una estrella de neutrones, porque estos objetos no pueden tener masas mayores de 1.44 y 3 masas solares, respectivamente. Nunca podremos "probar" esta teoría de Cygnus X-1 "viendo" el agujero negro, pero la evidencia circunstancial es fuerte. Otros tres objetos -- LMC X-3 en la Nube Mayor de Magallanes, y A0620-00 y V404 Cygni en nuestra galaxia -- también se cree que tienen agujeros negros como una de sus componentes.

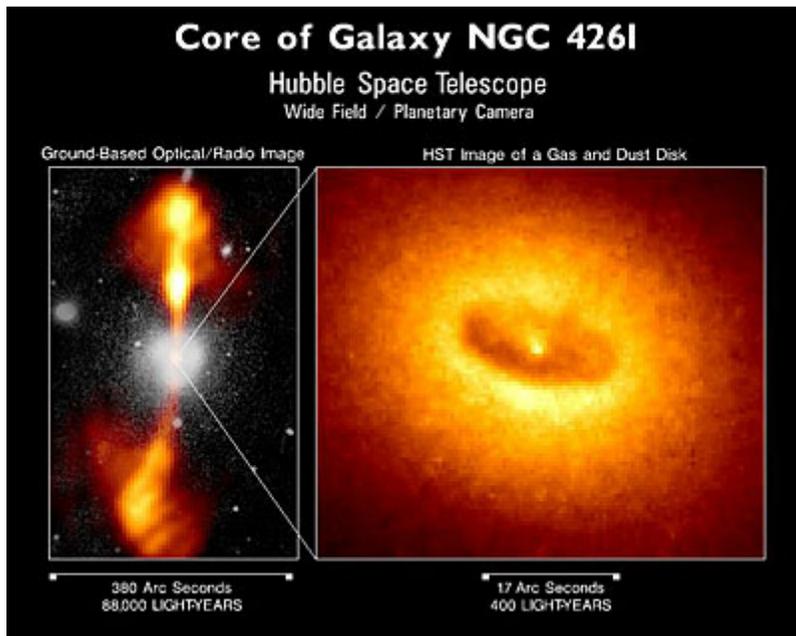
Agujeros Negros Supermasivos

Hace un cuarto de siglo, los astrónomos descubrieron unos objetos distantes muy raros que producían una potencia extraordinariamente grande en un volumen extraordinariamente pequeño -- la potencia de un billón de soles en un volumen no mucho más grande que el del Sistema Solar. Llamaron a estos objetos "fuentes cuasistelares de radio" -- abreviado, cuásares -- porque se veían como estrellas, y producían grandes cantidades de ondas de radio además de luz. Los astrónomos también se dieron cuenta de que, aunque los cuásares eran raros, había muchos otros objetos -- aparentemente galaxias o estrellas -- que mostraban versiones menos extremas del mismo fenómeno: una potencia muy grande de un volumen muy pequeño. Estos objetos tenían otra notable propiedad en común: chorros de partículas de alta energía emitidos de sus centros. Estas propiedades eran tan difíciles de explicar usando el conocimiento físico de esa época, que algunos astrónomos llegaron a cuestionar si ese conocimiento era correcto!

Desde entonces, los astrónomos han encontrado una explicación para estos núcleos de galaxia activos que es consistente con las observaciones y la teoría -- aunque es una explicación sorprendente: en el centro de cada una de estas galaxias hay un agujero negro supermasivo, con una masa de millones o miles de millones de soles. El tamaño de su horizonte de eventos sería más o menos igual al tamaño del Sistema Solar. La potencia emitida que se observa podría explicarse con sólo que una cantidad de materia igual a una masa solar cayera cada año al agujero negro -- una cantidad que fácilmente podría venir de los "vientos" de gas producidos por las estrellas cercanas al núcleo. Los chorros de partículas en los núcleos de galaxia activos son producidos por el material cayendo en espiral a un disco alrededor del agujero negro, y que es aplastado hacia arriba y abajo del disco cuando trata de entrar al agujero negro. Esta explicación para el "motor" en un núcleo de galaxia activo se apoya fuertemente en las imágenes obtenidas por el *Telescopio Espacial Hubble* (ver figura arriba).

¿Cómo se forma un agujero negro supermasivo? Algunas teorías sostienen que la primera generación de estrellas incluyó una gran proporción de estrellas muy masivas, y todas ellas formaron agujeros negros que de alguna manera se fusionaron. Otras teorías sostienen que un sólo agujero negro "semilla" acreció estrellas y gas, volviéndose más y más masivo con el tiempo.

Hay evidencia de que estos agujeros negros supermasivos existen en muchas galaxias, incluyendo nuestra Vía Láctea, y nuestra galaxia vecina más cercana, la galaxia de Andrómeda (también conocida como M31). También hay evidencia de que se forman muy temprano en la vida de la galaxia: vemos cuásares tan lejanos que su luz, viajando a 300,000 kilómetros/seg, debió haberlos abandonado poco después de que se formaron. Así pues, los agujeros negros supermasivos podrían ser parte normal del proceso de nacimiento y evolución de galaxias.



A composite image of the active galaxy NGC 4261, showing jets of radio-emitting particles spurting from the core of the galaxy. On the right: a false-color image from the Hubble Space Telescope, showing a dark, doughnut-shaped structure surrounding a possible supermassive black hole, believed to be the "central engine" of the galaxy. (Photo credit: Walter Jaffe, Leiden Observatory; Holland Ford, STScI, NASA)

Agujeros Negros y Ciencia Ficción

Un concepto tan extraño como el de agujero negro naturalmente atrae los intereses y la creatividad de los escritores de ciencia ficción. Un tema favorito es el uso de un agujero negro como una ruta a otros lugares u otros tiempos en el universo. Matemáticamente, un par de agujeros negros podrían formar un "puente" entre dos lugares en el universo, pero no está claro cómo dicho puente podría formarse o sobrevivir. Un agujero negro, como el que se forma con los despojos de una estrella, sería más bien inconveniente para viajes espaciales, porque la materia que cayera en él sería aplastada e incinerada por fuerzas de marea conforme entrara en el agujero. Un agujero negro supermasivo tendría fuerzas de marea menos extremas, pero se piensa que el más cercano está en el centro de nuestra galaxia -- ¡y por tanto a una distancia inconveniente! Un agujero negro rotante tiene posibilidades más interesantes, porque en él existe una región llamada la ergósfera, justo afuera del horizonte de eventos, que tiene la siguiente propiedad -- los objetos pueden entrar y salir de la ergósfera (si soportan las fuerzas de marea). Una nave espacial llena de basura podría entrar en la ergósfera, botar su carga dentro del agujero negro, y salir con más energía que la que tenía al entrar --- ¡resolviendo la crisis de energía y el problema de contaminación simultáneamente (al menos en teoría)!



Agujeros Negros

Actividad #1: Contracción

Propósito:

Demostrar como podría formarse un agujero negro.

Materiales:

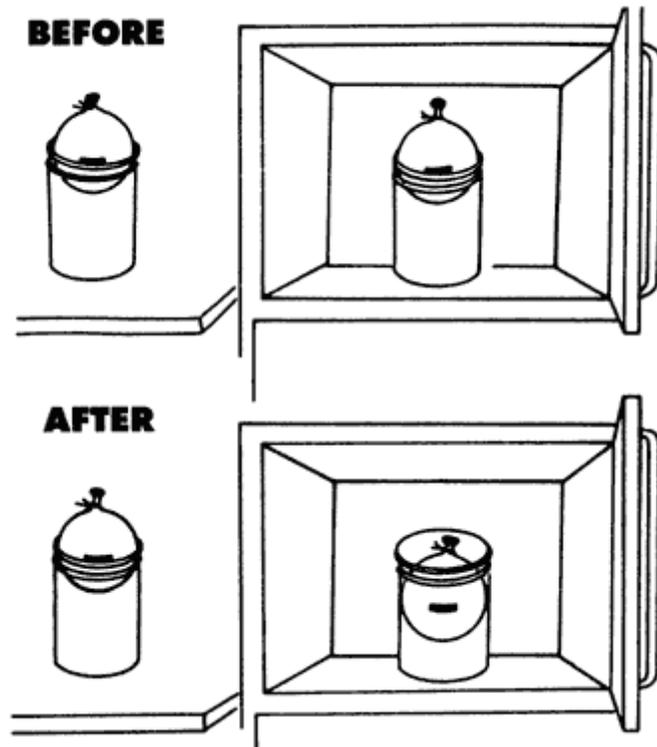
- Dos globos (pequeños, redondos)
- dos tarros de boca ancha
- un marcador de tinta indeleble.

Procedimiento:

1. Prepare dos tarros separados, con un globo inflado en el interior de cada uno.
2. Sostenga cada globo de tal manera que su boca quede por arriba del borde del tarro, y el resto del globo dentro del tarro.
3. Infle los globos dentro de los tarros.
4. Anude el extremo de cada globo para cerrarlo.
5. Haga una marca en cada globo, justo arriba de la orilla del tarro, con el marcador.
6. Ponga uno de los tarros en el congelador durante 30 minutos, y deje el otro tarro sobre la mesa para que permanezca a temperatura ambiente.
7. Después de 30 minutos, saque el tarro del congelador.
8. Observe la posición de la marca en ambos globos.

Resultados:

El globo a temperatura ambiente no cambia, pero el enfriamiento del globo en el congelador lo hace que se contraiga y se meta dentro del tarro.

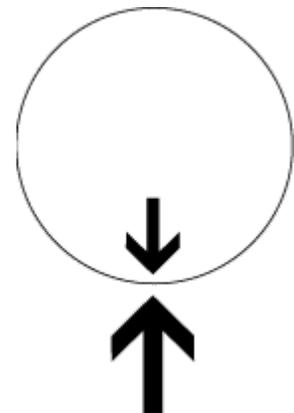


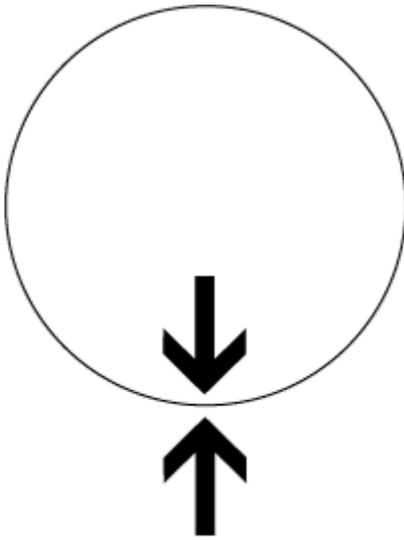
At room temperature, the mark on both balloons remains the same. But after one is refrigerated and shrinks, the marks are at different levels.

Explicación:

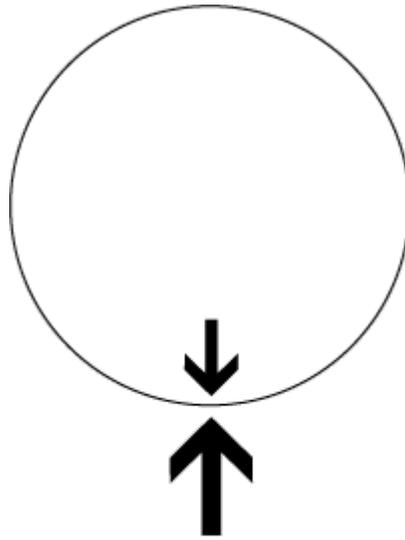
El gas dentro del globo empuja hacia afuera, mientras que el aire exterior y la superficie elástica del globo empujan hacia adentro. El tamaño del globo no cambia mientras la presión hacia afuera del gas y la presión elástica hacia adentro son iguales. Este es el caso del globo que permaneció a temperatura ambiente.

El globo en el congelador se contrajo cuando la presión del gas en su interior disminuyó. La presión del gas es proporcional a su temperatura. Si la presión del gas interior continuara disminuyendo, la fuerza que la superficie elástica del globo hace hacia adentro lo haría más y más pequeño. Es el balance entre la presión del aire exterior y la de la superficie elástica que empujan hacia adentro, y la presión del aire interior empujando hacia afuera, lo que puede demostrar la formación del agujero negro. Las reacciones nucleares en el centro de una estrella producen una presión de gas hacia afuera. Mientras esta presión balancea la atracción gravitacional hacia adentro, el tamaño de la estrella permanece estable. Cuando las reacciones nucleares se detienen, se altera el balance, y la gravedad atrae los materiales de la estrella hacia el centro. Si la masa de la estrella, y por tanto su gravedad, es suficientemente grande, entonces nada puede evitar que la contracción continúe hasta que la estrella es tan pequeña que se vuelve invisible. Se convierte en un agujero negro.





1) At room temperature, the pressure of gas inside the balloon pushing out balances the pressure of air outside the balloon pushing in.



2) As the balloon cools in the refrigerator, the pressure inside decreases. The pressure is determined, in part, by how fast the gas molecules move. As the temperature cools, the molecules slow down, resulting in a decreased pressure inside the balloon. Without enough pressure to resist the inward push of the outside air, the balloon shrinks.

3) The balloon stops shrinking when the pressure inside once again balances the outside pressure. Even though the gas molecules inside are moving slower (due to lower temperature), they are moving within a smaller volume, and so the inside pressure starts to increase as the balloon continues to shrink. Once the two pressures are equal, the shrinking stops.

"Shrinking" de *Astronomy for Every Kid*, por Janice Van Cleave. Copyright 1991, John Wiley and Sons, Inc. Usado con permiso.



Agujeros Negros

Actividad #2: Un Modelo a Escala de un Agujero Negro

El radio del horizonte de eventos de un agujero negro con la masa del Sol sería de cerca de 3 kilómetros, más o menos el mismo tamaño de una ciudad, barrio o colonia. Si la Tierra pudiera comprimirse para convertirse en un agujero negro, el radio de su horizonte de eventos sería $1/330,000$ de esto, porque la masa de la Tierra es $1/330,000$ de la masa del Sol. Pídale a sus estudiantes que calculen este radio (cerca de 1 centímetro) y sugiera un objeto común que pueda ser usado para representarlo en el modelo completo (por ejemplo, una canica). También puede ser instructivo construir un modelo a escala del sistema binario Cygnus X-1, para apreciar los tamaños relativos de una estrella normal y un agujero negro. La escala de este modelo es 1 cm por cada 100,000 km.

Objeto	Diámetro Real (kilómetros)	Diámetro a Escala (centímetros)
Supergigante azul HDE 226868	30,000,000	300
Disco de Acreción en Cygnus X-1	20,000,000	200
Protuberancia del disco de acreción	700,000	7
Región que emite rayos X	20,000	0.2
Horizonte de eventos del agujero negro	60	0.0006
Sol	1,400,000	14

En una escala más grande en la que el agujero negro tiene el tamaño de una moneda pequeña, el Sol tendría el tamaño de un campo de fútbol, y la supergigante HDE 226868 sería del tamaño de un pueblo.

Mitos sobre agujeros negros

MITO: Todas las estrellas colapsan para convertirse en agujeros negros al morir.

REALIDAD: Sólo estrellas masivas muy raras (¡una en millones!) terminan de esta manera.

MITO: Un agujero negro en el espacio devoraría toda nuestra galaxia.

REALIDAD: Hay tanto espacio entre las estrellas que un agujero negro únicamente afectaría los objetos que están muy cerca de él.

MITO: El agujero negro en Cygnus X-1 está devorando a la supergigante azul.

REALIDAD: Menos de un milésimo de la masa de la supergigante azul caerá al agujero negro antes de que ella también muera, más o menos dentro de un millón de años.

MITO: La materia que cae a un agujero negro reaparece en alguna otra parte del universo.

REALIDAD: La materia permanece en el agujero negro; en efecto, es la materia en el agujero negro la que

causa la fuerza gravitacional que nos permite descubrir estos objetos.

MITO: La gravedad de un agujero negro es diferente de la gravedad de un objeto normal.

REALIDAD: Si el Sol se convirtiera repentinamente en un agujero negro (que no lo hará, dicho sea de paso, porque su gravedad es demasiado débil para que colapse completamente sobre sí mismo) la Tierra y los planetas continuarían moviéndose normalmente. Sin embargo, ¡ la Tierra habría perdido su fuente de luz y calor !

MITO: Los agujeros negros son muy densos.

REALIDAD: Los agujeros negros pequeños y medianos son muy densos, pero un agujero negro supermasivo con 100 millones de masas solares, por ejemplo, tendría la misma densidad que el agua. (Usted mismo puede calcular esto a partir de la masa del agujero negro y el radio de su horizonte de eventos; se asume que toda la materia está distribuida dentro de todo el horizonte de eventos, no sólo en la singularidad.)

Lecturas Adicionales sobre Agujeros Negro

- *Black Holes, (Agujeros Negros)*, un paquete de información preparado por la Sociedad Astronómica del Pacífico (A.S.P.), conteniendo reimpressiones de artículos, y una lista de lecturas.
- Kaufmann, W.: *Black Holes and Warped Spacetime. (Agujeros Negros y Espacio-tiempos alabeados)*. 1979, W.H. Freeman & Sons. Una visión general breve, no técnica.
- Parker, B.: "In and Around Black Holes" ("Dentro y Alrededor de los Agujeros Negros") en *Astronomy*, Oct. 1986, p. 6. Un artículo no técnico que describe las fascinantes propiedades de los agujeros negros.
- Shipman, H.: *Black Holes, Quasars and the Universe, (Agujeros Negros, Cuásares y el Universo)*, 1980, Houghton Mifflin. Un libro un poco más avanzado, que da un excelente recuento de cómo se hace la investigación astronómica moderna.
- Thorne, K.: "The Search for Black Holes" ("La Búsqueda de Agujeros Negros") en *Scientific American*, Dec. 1974, p 32. Un artículo clásico, semi-técnico, espléndido.

Ciencia Ficción con un Tratamiento Interesante y Preciso de Agujeros Negros:

- Niven, L.: *A Hole in Space, (Un Agujero en el Espacio)*, 1974 Ballantine
- Niven, L.: *Neutron Star, (Estrella Neutrónica)*, 1968 Ballantine
- Pournelle, J.: *Anthology of Black Holes, (Antología de Agujeros Negros)*, 1978 Fawcett

Traducido por Gustavo A. Ponce