

## AGUJEROS NEGROS

La mayor parte del contenido de este trabajo está basado en la obra de **Ángel Torregrosa**, publicada en su web

<http://www.relatividad.org/agujeros.html>

y cuya visita recomendamos para profundizar en el tema.

### ¿QUÉ ES UN AGUJERO NEGRO?

Son cuerpos con un campo gravitatorio extraordinariamente grande.

No puede escapar ninguna radiación electromagnética ni luminosa, por eso son negros.

Es un agujero porque las cosas pueden caer, pero no salir de él, y es negro porque 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 es mayor que la velocidad de la luz, conocido como el último límite de velocidad en el universo.

Están rodeados de una "frontera" esférica que permite que la luz entre pero no salga.

Hay dos tipos de agujeros negros: cuerpos de alta densidad y poca masa concentrada en un espacio muy pequeño, y cuerpos de densidad baja pero masa muy grande, como pasa en los centros de las galaxias.

Si un componente de una estrella binaria se convierte en agujero negro, toma material de su compañera. Cuando el remolino se acerca al agujero, se mueve tan deprisa que emite rayos X. Así, aunque no se puede ver, se puede detectar por sus efectos sobre la materia cercana.

Los agujeros negros no son eternos. Aunque no se escape ninguna radiación, parece que pueden hacerlo algunas partículas atómicas y subatómicas.

Alguien que observase la formación de un agujero negro desde el exterior, vería a una estrella cada vez más pequeña y roja hasta que, finalmente, desapareciera. Su influencia gravitatoria, sin embargo, seguiría intacta.

Como en el Big Bang, en los agujeros negros se da una singularidad, es decir, las leyes físicas y la capacidad de predicción fallan. En consecuencia, ningún observador externo puede ver qué pasa dentro.

Las ecuaciones que intentan explicar una singularidad de los agujeros negros han de tener en cuenta el espacio y el tiempo. Las singularidades se sitúan siempre en el pasado del observador (como el Big Bang) o en su futuro (como los colapsos gravitatorios). Esta hipótesis se conoce con el nombre de "censura cósmica".

Un agujero negro es un objeto que tiene tres propiedades: masa, espín y carga eléctrica. 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 continuará colapsándose hasta tener radio cero, punto conocido como singularidad, de densidad infinita, con lo cual no se tiene experiencia en la Tierra.

En teoría, los agujeros negros vienen en tres tamaños: mini agujeros negros, agujeros negros medianos y agujeros negros supermasivos.

En 1971, Stephen Hawking teorizó que en la densa turbulencia creada por el fenómeno conocido como

Big Bang, se formaron presiones externas las cuales ayudaron en la formación de los mini agujeros negros. Estos serían tan masivos como una montaña, pero tan pequeños como un protón; radiarían energía espontáneamente, y después de miles de millones de años finalizarían con una violenta explosión.

Por otro lado, hay buena evidencia de que los agujeros negros medianos 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, incluyendo, de la nuestra, el cual se ha establecido que tiene una masa de 2.5 millones de veces la del Sol. Estos agujeros negros supermasivos tienen un horizonte de eventos más o menos igual al tamaño del Sistema Solar.

## ¿CÓMO SE FORMA UN AGUJERO NEGRO?

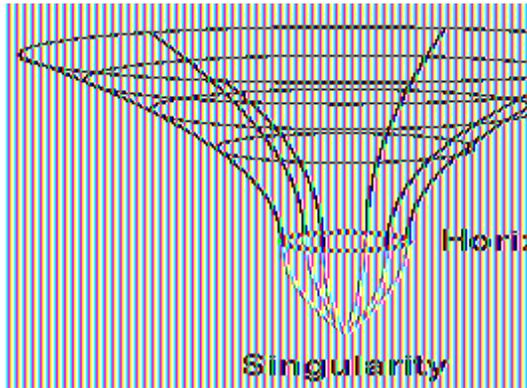
Supongamos una estrella como el sol que va agotando su combustible nuclear convirtiendo su hidrógeno a helio y este a carbono, oxígeno y finalmente hierro llegando un momento en que el calor producido por las reacciones nucleares es poco para producir una dilatación del sol y compensar así a la fuerza de la gravedad. Entonces el sol se colapsa aumentando su densidad, siendo frenado ese colapso únicamente por la repulsión entre las capas electrónicas de los átomos. Pero si la masa del sol es lo suficientemente elevada se vencerá esta repulsión pudiéndose llegar a fusionarse los protones y electrones de todos los átomos, formando neutrones y reduciéndose el volumen de la estrella, no quedando ningún espacio entre los núcleos de los átomos. El sol se convertirá en una esfera de neutrones y por lo tanto tendrá una densidad elevadísima. Será lo que se denomina "estrella de neutrones".

Naturalmente las estrellas de neutrones no se forman tan fácilmente, ya que al colapsarse la estrella la energía gravitatoria se convierte en calor rápidamente provocando una gran explosión. Se formará una nova o una supernova expulsando en la explosión gran parte de su material, con lo que la presión gravitatoria disminuirá y el colapso podrá detenerse. Así se podrá llegar a lo que se denomina enanas blancas en las que la distancia entre los núcleos atómicos ha disminuido de modo que los electrones circulan libres por todo el material, y es la velocidad de movimiento de estos lo que impide un colapso mayor. Por lo tanto la densidad es muy elevada pero sin llegar a la de la estrella de neutrones. Pero la velocidad de los electrones tiene un límite: la velocidad de la luz; y cuando el equilibrio estelar exige una velocidad de los electrones superior a la velocidad de la luz, el colapso a neutrones es inevitable.

Se ha calculado que por encima de 2.5 soles de masa, una estrella de neutrones se colapsará más aún fusionándose sus neutrones. Esto es posible debido a que el principio de exclusión de Pauli por el cual se repelen los neutrones tiene un límite cuando la velocidad de vibración de los neutrones alcanza la velocidad de la luz.

Debido a que no habrá ninguna fuerza conocida que detuviera el colapso, este continuará hasta convertir la estrella en un punto creándose un agujero negro. Este volumen puntual implicará una densidad infinita, por lo que fue rechazado en un principio por la comunidad científica, pero S. Hawking demostró que esta singularidad era compatible con la teoría de la relatividad general de Einstein.

Un agujero negro será un lugar en el cual la curvatura será infinita.



Dentro del horizonte de eventos, el espacio está tan curvo que nada se puede escapar.

### TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL Y LOS AGUJEROS NEGROS.

Es posible hallar la relación entre la masa y el radio de un agujero negro esférico teniendo en cuenta que la velocidad máxima que puede alcanzar un objeto, según la teoría de la relatividad, es la velocidad de la luz.

La velocidad de escape en la superficie de un astro esférico será la velocidad máxima que puede alcanzar un objeto para mantenerse en órbita alrededor del astro. Esto ocurrirá cuando la energía cinética del objeto sea igual a la energía potencial debida a la atracción gravitatoria del astro.

La energía cinética según la mecánica clásica es:

$E_c = \frac{1}{2} mv^2$  y la energía potencial es  $E_p = GmM/r$  siendo  $v$  la velocidad del objeto en órbita,  $m$  la masa del objeto en órbita,  $M$  la masa del astro,  $r$  la distancia desde el centro del astro hasta el punto donde se encuentra el objeto en órbita y  $G$  la constante de gravitación universal. Igualando la energía potencial con la energía cinética y despejando la velocidad obtenemos la ecuación de la velocidad de escape:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Entonces

entonces para una velocidad de escape igual a la velocidad de la luz  $c$  y despejando  $M/r$  de la anterior fórmula obtenemos

$$\frac{M}{r} = \frac{c^2}{2G}$$

como  $c=2.99793 \times 10^8$  m/s y  $G=6.6732 \times 10^{-11}$  Nm<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup> obtenemos que

$$\hat{M}/r=6.734 \times 10^{26}$$
 kg/m

Que ser $\hat{M}/r$  la relaci $\hat{M}/r$ n entre la masa y el radio de un cuerpo esf $\hat{M}/r$ rico para que sea un agujero negro. Con esta relaci $\hat{M}/r$ n podemos hallar el radio que deber $\hat{M}/r$ -an tener diversos objetos estelares para ser un agujero negro.

**TABLA DE RADIOS CORRESPONDIENTES A AGUJEROS NEGROS  $\hat{M}/r$**

MASA	RADIO
1 sol (2 x 10 <sup>30</sup> Kg) $\hat{M}/r$	3 Km
25 soles (gigantes azules)	75 Km
1000 soles	3000 Km
107 soles (n $\hat{M}/r$ cleo gal $\hat{M}/r$ ctico)	3 x 107 Km
1011 soles (galaxia)	3 x 1011Km

As $\hat{M}/r$ - podemos ver que si el Sol pudiera ser comprimido hasta ser una esfera de 3 Km de radio se convertir $\hat{M}/r$ -a en un agujero negro.

Pero esto es mezclar la teor $\hat{M}/r$ -a de relatividad con la mec $\hat{M}/r$ nica cl $\hat{M}/r$ sica, ya que la ecuaci $\hat{M}/r$ n de la energ $\hat{M}/r$ -a cin $\hat{M}/r$ tica de un cuerpo seg $\hat{M}/r$ n la relatividad especial es diferente a la cl $\hat{M}/r$ sica:

$$E_c = mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

Así se obtiene una velocidad de escape relativista

$$V_{er} = c \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{MG}{rc^2}\right)^2}}$$

Se observa que la velocidad de escape nunca podrá alcanzar la velocidad de la luz más que en un astro de masa infinita o radio cero.

Pero esto es considerando únicamente la teoría de la relatividad especial. Si tenemos en cuenta la teoría de la relatividad general de Einstein, aparecen unas nuevas consecuencias muy interesantes.

### LA RELATIVIDAD GENERAL Y LOS AGUJEROS NEGROS.

Según la teoría de la relatividad general de Einstein, en las cercanías de una gran masa el tiempo transcurre más despacio debido a la acción gravitatoria.

Einstein dedujo (como podemos leer en su libro "El significado de la relatividad") la siguiente fórmula:

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{\chi}{4\pi} \int \frac{\sigma}{r} dV_0}$$

$\hat{\chi}$  siendo  $\chi = 8\pi \cdot G/c^2$

$\hat{t}$  t' = tiempo transcurrido a una distancia r del centro de gravedad de la masa (un astro) productora del campo gravitatorio

$\hat{t}$  t = supuesto tiempo objetivo (transcurrido en las lejanías del campo gravitatorio)

= densidad del astro

$\hat{V}_0$  = Volumen del astro

$\hat{r}$  r = distancia desde el centro del astro hasta el punto del espacio que estamos analizando.

$\hat{\chi}$  Entonces sustituyendo  $\chi$  por su valor se obtiene

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{2G}{c^2} \int \frac{\sigma}{r} dV_0}$$

Â y comoÂ

$$\int \frac{dV}{r}$$

es la masa M del astro dividida por el radio r, se obtiene

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}}$$

Â y como segÃºn la ecuaciÃ³n  $2GM/r = v_e^2$  siendo  $v_e$  la velocidad de escape clÃ¡sica a la distancia r del centro del astro, obtenemos

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}}$$

Â Â

(Se puede hacer otra deducci3n de esta f3rmula, m3s did3ctica, por medio del principio de equivalencia)

De aqu3 se deduce que *a medida que un cuerpo se acerca a un astro el tiempo transcurre m3s despacio* para 3ste cuerpo, en funci3n de la velocidad de escape del astro (desde un punto de vista cl3sico), de modo que cuando se llegue a una distancia tal que la velocidad de escape cl3sica sea igual a la velocidad de la luz, el tiempo se detendr3 para el objeto situado en ese lugar. O sea para  $r=2GM/c^2$  que es el llamado **radio de Schwarchild**.

Aparece as3 una superficie esf3rica alrededor del agujero negro en la cual el tiempo se detiene. Esta superficie esf3rica es el llamado **horizonte de sucesos** del agujero negro.

Al atravesar este horizonte el tiempo vuelve a existir pero con componentes imaginarias (el c3culo del tiempo transcurrido en el interior del horizonte de sucesos nos lleva a una ra3z cuadrada de un numero negativo), lo cual nos lleva a pensar que el tiempo transcurre en el interior de un agujero negro tal vez en una quinta dimensi3n perpendicular tanto a las tres espaciales como a la temporal normal.

Adem3s la teor3a de la relatividad general nos dice que el **espacio se curva** alrededor de una masa de tal forma que un rayo de luz que pasara rozando esa masa se desviar3a el doble de lo que lo har3a si estuviera afectado por la gravedad desde un punto de vista cl3sico (como part3cula). As3 Einstein obtuvo realizando algunas aproximaciones que la desviaci3n era:

$$\alpha = \frac{4GM}{rc^2}$$

que nos proporciona un ángulo de 1,75 segundos de grado en un rayo de luz que pase rozando el sol. Esto fue comprobado mediante la observación de eclipses.

También obtuvo que la luz emitida por una estrella deba tener un **espectro algo desplazado hacia el rojo**, o sea que la luz emitida tendrá una frecuencia menor de lo normal debido a que todos sus electrones vibrarán con más lentitud a causa de sea detención parcial del tiempo obteniendo la fórmula:

$$\lambda' = \lambda_0 \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}}$$

Podemos apreciar que si el radio fuera  $2GM/c^2$  (radio del horizonte de sucesos) la frecuencia será a cero y por lo tanto no veremos la luz procedente de la estrella.

Se calcula que para dicho radio la curvatura del espacio será tal que la luz quedará atrapada en el agujero. De esta forma al acercarnos al horizonte de sucesos las tres coordenadas espaciales normales se curvan de tal forma que cualquier movimiento en el interior del agujero se producirá en dirección hacia el centro de éste.

De este modo todo lo que traspase el horizonte de sucesos no podrá salir jamás.

#### DETECCIÓN DE LOS AGUJEROS NEGROS.

Tal y como hemos descrito un agujero negro nunca podríamos observar uno de ellos ya que no reflejarían ni emitirían ningún tipo de radiación ni de partícula. Pero hay ciertos efectos que sí pueden ser detectados. Uno de estos efectos es el efecto gravitatorio sobre una estrella vecina.



Supongamos un sistema binario de estrellas (dos estrellas muy cercanas girando la una alrededor de la otra) en el cual una de las estrellas es visible y de la cual podemos calcular su distancia a la Tierra y su masa. Esta estrella visible realiza unos movimientos oscilatorios en el espacio debido a la atracción gravitatoria de la estrella invisible. A partir de estos movimientos se puede calcular la masa de la estrella invisible.

Si esta estrella invisible supera una masa de unas 2.5 veces la masa de nuestro sol, tendremos que suponer que se trata de un agujero negro. Además si la estrella visible está lo suficientemente cerca, podrá ir cediéndole parte de su masa que caerá hacia el agujero negro siendo acelerada a tal velocidad que alcanzará una temperatura tan elevada como para emitir rayos X. Pero esto también puede suceder si se tratara de una estrella de neutrones en vez de un agujero negro.



Un ejemplo de objeto detectado que cumple las dos condiciones primeras expuestas es la estrella binaria llamada **Cygno-X1**, que es una fuente de rayos X muy intensa formada por una estrella visible y una estrella invisible con una masa calculada que supera las 2.5 masas solares. También se han detectado objetos de miles de masas solares en los centros de galaxias, candidatos a agujeros negros supermasivos.

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 HD 226868. Los rayos X son producidos conforme el gas de la atmósfera de la supergigante azul cae hacia el objeto colapsado y se calienta.

A parte de esto también hay que tener en cuenta que S. Hawking dedujo que un agujero negro producirá a partículas subatómicas en sus proximidades, perdiendo masa e irradiando dichas partículas, lo cual será a otro modo de detección.

Podemos leer en *Agujeros negros y Pequeños Universos* de Stephen Hawking, en su conferencia "El Futuro del universo" diciendo:

*"El principio de indeterminación de la mecánica cuántica indica que las partículas no pueden tener simultáneamente muy definidas la posición y la velocidad. Cuanto mayor sea la precisión con que se defina la posición de una partícula, menor será la exactitud con que se determine su velocidad y viceversa. Si una partícula se encuentra en un agujero negro, su posición está muy definida allí, lo que significa que su velocidad no puede ser exactamente definida. Es posible que la velocidad de la partícula sea superior a la de la luz, de esta forma podrá escapar del agujero negro."*

Pero no debemos pensar que el agujero perderá masa, ya que un agujero negro de unas pocas masas solares emitirá una radiación inferior a la radiación de fondo del universo, con lo cual recibirá más energía de la que emitirá, y por lo tanto aumentará su masa.

### **AGUJERO NEGRO NO PUNTUAL.**

En el apartado sobre la formación de los agujeros negros hablamos de que una estrella podrá contraerse hasta ser un simple punto. Esto representaba una singularidad tanto de densidad como de curvatura del espacio (densidad y curvatura infinitas), además de tiempos imaginarios en su interior. Sin embargo un cuerpo que caiga hacia un agujero negro tardará un tiempo infinito, desde el punto de vista de un observador suficientemente alejado, ya que las longitudes se contraen a medida que nos acercamos al horizonte de sucesos (en el apartado contracción de longitudes en un campo gravitatorio podemos ver una demostración de esta contracción) y entonces, aunque la velocidad se mantenga desde el punto de vista del observador que cae, ésta irá disminuyendo hacia cero para el observador externo. Así cabe la posibilidad de que nunca llegara a formarse un agujero negro

Pero además de esto, se me ocurre una posibilidad de que exista algo que pueda detener este colapso final hacia un punto (si esto fuera posible) y esto es la detención del **tiempo**.

De aquí tenemos que, en el supuesto de que a pesar de todo la materia pudiera colapsarse y sobrepasar el horizonte de sucesos, los problemas de singularidad se podrán evitar basándonos en el hecho de que en el horizonte de sucesos el tiempo se detiene.

Recordemos que según la relatividad general la velocidad de la luz disminuye a medida que se acerca a una masa (hecho comprobado al enviar y recibir señales de radio a sondas situadas casi detrás del Sol). Entonces, si la luz se frena hasta detenerse, también se detendrá toda caída y movimiento al acercarse al horizonte de sucesos.

Supongamos un astro cuya distribución de densidades interiores sea tal que la situación que caracteriza a un horizonte de sucesos se dé en todo el volumen del astro.

En este caso el tiempo estará detenido en todo el volumen de astro (el horizonte de sucesos será a una esfera, no una superficie esférica) y por lo tanto el colapso a partir de este punto no ocurrirá a ningún momento cuando se hubiera superado la presión soportable por los neutrones, y los neutrones ya estuvieran fusionándose.

Así en una estrella colapsándose sus neutrones, si se consiguiera esta distribución de densidades se detendrá el colapso al detenerse el tiempo.

Para obtener dicha distribución debemos tener en cuenta que la gravedad en el interior de un astro es igual a la que tendríamos si le quitáramos una corona esférica justo por encima del punto en que queremos calcular la intensidad del campo gravitatorio (ya que en el interior de una corona esférica el campo gravitatorio queda anulado). Así tenemos que los cálculos son los mismos que para un punto en la superficie pero teniendo en cuenta sólo el volumen que queda por debajo de dicho punto.

Entonces según la ecuación (4) tenemos que  $M'/r'$  ha de tener una relación constante en todo el astro siendo  $M'$  la masa de la esfera de radio  $r'$  con centro en el mismo centro de la estrella. O sea

$$\frac{M'}{r'^3} = \frac{c^2}{2G} = K$$

~~~~~

Así y por lo tanto si despejamos la masa

$$M' = Kr'^3$$

Por otro lado, la masa total del astro será igual a la suma de todos los diferenciales de masa, siendo un diferencial de masa igual a la densidad en un punto determinado de la esfera ( $\rho$ ) multiplicada por el diferencial de volumen, que será igual al área de la superficie esférica multiplicada por un diferencial de radio. Por lo tanto obtendremos que

$$M = \int_0^R \rho \cdot 4\pi r^2 \cdot dr$$

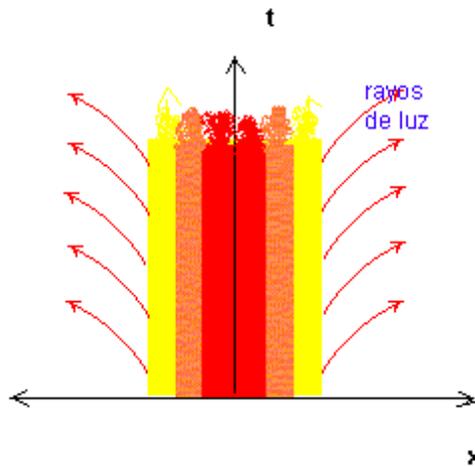
Una solución evidente de (x) para que la integral dé como resultado  $Kr'^3$  es

$$\sigma(x) = \frac{K}{4\pi x^2} = \frac{c^2}{8\pi G x^2}$$

siendo x la distancia desde el punto del astro que estudiamos al centro del mismo.

A mayor profundidad tendremos mayor densidad inversamente proporcional al cuadrado del radio. Esto nos lleva a una densidad infinita en el centro del astro, pero debemos tener en cuenta que cuando el radio se hace cero la masa también tiende a cero, lo cual hace esta situación más aceptable.

Podría ser que este tipo de agujero negro fuera común en todos los agujeros negros, ya que en una implosión estelar la fusión de neutrones empezaría a realizarse en el centro de la estrella, y la situación de tiempo detenido empezaría a darse en el centro de la estrella impidiendo la fusión de más materia en ese punto. Esta situación se iría extendiendo capa a capa hacia afuera creándose una distribución de densidades como



la que he calculado, y por lo tanto un **agujero negro sólido** desde el horizonte de sucesos hacia el interior. Sin singularidad.

De todos modos, como me han comentado varios lectores, todo esto sería desde el punto de vista de un observador externo (lo más alejado posible), o lo que es lo mismo desde un punto de vista de un tiempo cósmico, mientras que un observador local que cayera hacia el agujero negro no notarían dicho enlentecimiento del tiempo pues para cada uno su tiempo es el natural. En todo caso si esa persona mirase hacia la estrella vecina la vería envejecer y girar más rápido de lo normal, pues para él el tiempo de la estrella vecina estaría acelerado. Como vemos, la percepción del tiempo es relativa.

En la siguiente página podemos ver como serían los gráficos espacio-tiempo del colapso de una estrella según el modo clásico y según esta hipótesis.

## GRÁFICOS DE UNA ESTRELLA COLAPSANDO.

Vamos a trazar un gráfico espacio-tiempo de una estrella colapsándose.

Como no podemos representar en un papel 3 dimensiones espaciales y otra temporal, dibujaremos sólo una de las dimensiones espaciales y la temporal. Así representaremos sólo el eje  $x$  y el tiempo, poniendo el origen de coordenadas en el centro de la estrella y atravesando el eje  $x$  a toda la estrella.

De este modo tenemos que una *estrella estable* se representará como en el gráfico de la izquierda, simplemente existiendo la estrella en la misma situación a lo largo del tiempo. En este gráfico he puesto las capas exteriores de la estrella de color más claro y las interiores más oscuras.

Los rayos de luz emitidos por la estrella partirán algo más lentos en las proximidades de la estrella (por los efectos de la gravedad sobre el tiempo y el espacio) y luego con mayor velocidad a medida que se alejan de la estrella acercándose a la velocidad conocida de la luz en el vacío<sup>3</sup>. Por ello su representación es una curva en el gráfico  $e-t$  pues se aceleran con el tiempo.

La representación clásica de una *estrella colapsando*, con un diagrama de este tipo es la siguiente:

Aquí tenemos que la estrella se colapsa hacia el centro hasta formar un simple punto y ocupar un espacio cero.

El comportamiento de los rayos de luz se vuelve peculiar. Los rayos de luz que son emitidos en el horizonte de sucesos se quedan en dicho lugar (no avanzan en  $x$ ) mientras el tiempo sigue transcurriendo, y por esto su representación es la línea roja vertical. Los rayos de luz emitidos dentro del horizonte de sucesos también colapsan hacia el centro del agujero negro pues la deformación del espacio-tiempo provocan que esta sea la única dirección posible en el interior del agujero.

Pero si tenemos en cuenta la hipótesis de que al endentecerse el tiempo también se endentecerá el colapso, y en el horizonte de sucesos al detenerse el tiempo también se detendrá el colapso, tenemos que *el gráfico debería ser:*

Según esta suposición el colapso se frena y la masa se compacta tendiendo hacia una distribución de densidades tal que toda la estrella se puede considerar un horizonte de sucesos. En realidad nunca se alcanzará este estado pues el tiempo tiende a detenerse a medida que se deforma el espacio-tiempo, de forma que la materia que se colapsa tiende a no avanzar nada de espacio ni siquiera hacia el centro de la estrella.

El colapso hasta la situación de equilibrio tardará a ser un tiempo infinito y el gráfico es entonces asintótico hacia dicha posición de equilibrio.

Aquí un rayo de luz emitido por la estrella "casi congelada" tardará a un tiempo "casi infinito" en salir de allí y llegar a un observador externo.

El agujero negro no llegará a formarse en realidad nunca, sino que será a la tendencia asintótica del colapso estelar, y por supuesto no se colapsará hacia un punto. Será un agujero negro en eterna formación.

## AGUJERO NEGRO EN ETERNA FORMACIÓN.

Cuando una estrella se colapsa al romperse el equilibrio de presiones, su radio disminuye hasta..... ¿hasta un punto? Puede que sí- o puede que no.

A medida que se colapsa tenemos que el radio disminuye mientras la masa se mantiene, con lo que los cálculos nos dicen que el tiempo va frenando su transcurrir. La velocidad de la luz se frena y es lógico pensar que también se frena todo movimiento incluso el colapso mismo. A medida que la densidad aumenta tendremos que el colapso se hace más lento de lo previsible, en una curva que tiende a la detención de dicho colapso.

El agujero negro nunca llega a formarse y permanece en un estado de eterno colapso cada vez más lento y **eterna formación**, sin llegar nunca a formarse del todo. Esta es una forma bastante probable de agujero negro, o casi.

Pero entonces ¿existen los agujeros negros?

Una posibilidad es que hayan existido siempre. Que desde el Big Bang queden restos del huevo primigenio que sigan existiendo en forma de agujeros negros. Serían los **agujeros negros eternos**, existentes desde el principio del tiempo. Estos agujeros negros pueden que absorbieran más materia después, y esta materia estaría en un estado de permanente y eterna caída hacia el agujero negro, tratando de unirse a él pero sin conseguirlo nunca, pues se detiene su caída al detenerse el tiempo en el horizonte de sucesos.

Estos agujeros negros eternos son conceptos matemáticos cuya existencia es de imposible demostración pero el estudio de conceptos matemáticos compatibles con la teoría de la relatividad general, sean o no sean físicamente concebibles, ha dado y da lugar a muchos conceptos e ideas nuevas e interesantes.

Una de estas ideas matemáticas son los agujeros de gusano. En principio podemos imaginar la existencia de varios universos paralelos funcionando a diferentes velocidades temporales, o mejor en *diferentes instancias temporales*, y conectados por un agujero de gusano. Son los **puentes de Einstein-Rosen** pensados por Einstein y su colaborador Atan Rosen en los años veinte. Esto también fue llevado a otro extremo por *John A. Wheeler* pensando que un agujero de gusano podría unir dos puntos del mismo universo. Wheeler bautizó a estos conceptos matemáticos como **agujeros de gusano**.



También se ha pensado en **máquinas del tiempo** poniendo una estrella de neutrones en una boca de un agujero de gusano para frenar el tiempo creando un diferencial de tiempo entre un extremo y otro.

## EVIDENCIA

Diferentes equipos de astrónomos han anunciado haber encontrado evidencias que permiten casi, prácticamente, asegurar la existencia de los agujeros negros en el universo. Junto a las detecciones de rayos X y gamma, se ha sumado el monitoreo que ha efectuado el Hubble Space Telescope (HST), con los nuevos instrumentos instalados en él sobre 27 galaxias cercanas, en las cuales, en algunas de ellas, se han podido detectar rastros de la desaparición de un sinnúmero de estrellas y otras que están siguiendo el mismo destino, como si fueran engullidas por un poderoso motor termonuclear. También, se ha podido comprobar en el espacio la existencia muy precisa de un disco de acreción de un diámetro de un quinto de año luz —prueba sólida de la existencia de un agujero negro— ubicado en la galaxia 3C390.3, situada a 1.000 millones de años luz de la Tierra. El satélite IUE de exploración ultravioleta de la Agencia Europea del Espacio fue el que hizo el hallazgo y además pudo medirlo. En nuestra galaxia, La Vía Láctea, desde el año 1990 sabemos de evidencias de contar con un cohabitante agujero negro, ubicado a unos 300 años luz desde la Tierra; lo detectó el telescopio Sigma y por su magnitud se le llamó "el gran aniquilador". Recientemente se han descubierto pruebas concluyentes de la existencia de un inmenso agujero negro en el centro de la galaxia elíptica gigante M87, que se encuentra a unos 57 millones de años luz de la Tierra en la constelación de Virgo. Se estima que este agujero negro tiene una masa equivalente a la de 3.000 millones de soles, compactada en un espacio de unas 11 horas-luz de diámetro.

Pero mayores evidencias sobre posibles agujeros negros siguen apareciendo. Una de las más relevantes registrada recientemente es la encontrada en la galaxia activa NGC 6251, ubicada a 300 millones de años luz desde la Tierra en la constelación de Virgo. Una sorprendente visión reportada por el Telescopio Espacial Hubble de un disco o anillo de polvo, urdido por efectos gravitatorios, que se trasluce a través de la emisión de un chorro de luz ultravioleta que está emanando desde un posible agujero negro.

Se trata de un fenómeno nuevo para los investigadores observadores del cosmos. Anteriormente, todo lo que se había podido detectar como evidencia de la existencia de un agujero negro era la detección de los efectos gravitatorios que éste genera en los objetos que van siendo atraídos a traspasar el horizonte de eventos, formando en ello una especie de disco de circunvalación constituido como una dona que conforma un capullo que rodea a algo gravitatoriamente poderoso, pero que de ello solamente era factible distinguir la luz intensiva que emana desde los gases calientes que ya se encuentran atrapados por la gravedad del agujero negro, el cual se halla empotrado en medio de la dona.

Pero lo que encontró el Hubble, es bastante más de lo que anteriormente habíamos podido ver sobre un agujero negro. En esta ocasión, se ha podido observar como ese agujero ilumina el disco de circunvalación que lo rodea, cuestión esta última, no muy extraña para una gran mayoría de físicos teóricos. En las tomas del Hubble se puede distinguir luz ultravioleta reflejándose sobre un lado del disco, el cual se encuentra urdido como la parte superior de un sombrero.

Tal urdidura podrá ser producto de perturbaciones gravitatorias que se estuvieran generando en el núcleo de la galaxia que almacena el disco, o bien, al pressing que genera el eje de rotación del agujero negro sobre el de la galaxia.

Si bien todavía no se conocen las posibles medidas de este agujero negro, las evidencias de su existencia se encuentra en la poderosa emisión que se detecta en la eyección de radiaciones que alcanza un espacio de tres millones de años luz y de las partículas que se han visto emanar desde la ubicación del agujero negro en el eje mismo de esta galaxia activa elíptica. Se piensa que muchas galaxias denominadas activas son la cuna de una apreciable cantidad de agujeros negros.

La imagen de arriba de la foto de la izquierda que corresponde al núcleo de la galaxia NGC 6251, es una combinación de una toma de imagen de luz visible captada por la cámara WFPC 2 del Telescopio Espacial Hubble, con otra captada de emisiones de luz ultravioleta por la cámara FOC.

Mientras la imagen de luz visible muestra un disco de polvo oscuro, la imagen ultravioleta (color azul) no se ve a los aspectos claros a lo largo de un lado del disco. La pregunta que salta aquí es: ¿Por qué el Hubble solamente pudo captar los reflejos ultravioletas de sólo un lado del disco? Los científicos que se encuentran llevando a cabo a estas investigaciones, preliminarmente han concluido que el disco debe urdirse como la parte superior de un sombrero. La mancha blanca al centro de la imagen corresponde a la luz que ilumina el disco que se distingue en la vecindad del agujero negro.

La imagen de abajo, corresponde a una toma telescópica de la galaxia activa NGC 6251, que se encuentra a 300 millones de años luz desde la Tierra, en la constelación de Virgo.

Otra de las evidencias sobre un posible agujero negro, encontradas últimamente por el HST, es el hallazgo de un disco circunvalatorio que se encuentra sometido a un proceso de desmaterialización generado por poderosas mareas gravitatorias que parecen provenir de un área central ubicada en el núcleo de la galaxia NGC 4261.

La foto de la derecha, corresponde a una toma realizada por el Hubble Space Telescope de la galaxia anteriormente mencionada y, en ella, resaltan tres importantes aspectos. Las partes exterior de color blanco, corresponde a las delimitaciones del núcleo central de la galaxia NGC 4261. En el interior del núcleo se puede observar a una especie de espiral de color café o marrón que parece que estuviera formando un disco circunvalatorio de materias, gases y polvo con las características de uno de acreción. Su peso se puede calcular en unas cien mil veces más que el Sol. Lo anterior es posible debido a que se trata de un objeto en rotación, lo que permite calcular el radio y la velocidad de su constitución y, de ello, calcular el peso de su parte central. El conjunto del fenómeno, incluido el disco circunvalatorio, comporta un diámetro semejante al que tiene sistema solar, pero pesa 1.2 millones veces más que el Sol. Ello implica que su gravedad es un millón de veces más poderosa que la del Sol. Por ello, casi se podrá asegurar que el fenómeno podrá ser la consecuencia de la presencia en ese lugar de esa galaxia de un agujero negro.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Albert Einstein, "Sobre la teoría especial y la teoría general de la relatividad (Alianza Editorial, 1961).
- Albert Einstein, "El significado de la relatividad" (Planeta Agostini, Barcelona, 1985).
- S. Weinberg, "Gravitation and cosmology" (John Wiley & Sons, New York, 1972).
- J. Audouze y otros, "Astrofísica en La Recherche" (Orbis, Barcelona, 1987).
- Lloid Motz, "El Universo (su principio y su fin)" (Orbis, Barcelona, 1986).
- Stephen W. Hawking, "La historia del tiempo" (Círculo de lectores, Barcelona, 1988).
- Jayant Narlikar, "La estructura del universo" (Alianza Universidad, Madrid, 1987).
- Jayant Narlikar, "Fenómenos violentos en el universo" (Alianza Universidad, Madrid, 1987).
- [http://cosmopediaonline.com/Agujeros Negros](http://cosmopediaonline.com/Agujeros_Negros).
- [http://apuntes.rincondelvago/agujeros-negros-y-pequeños-universos\\_stephen-hawking.html](http://apuntes.rincondelvago/agujeros-negros-y-pequeños-universos_stephen-hawking.html).  
Agujeros Negros y Pequeños Universos
- <http://geocities.com/angelto.geo/fisica.html>. Teoría de la Relatividad y Agujeros Negros.