

INFOFÍSICA

Agujeros negros

Si un cuerpo que se halla situado en la superficie de un astro de forma esférica, cuyo radio es R y su es masa M , la velocidad que debe proporcionársele para que puede escapar de la atracción gravitatoria, conocida como velocidad de escape, hemos encontrado que viene determinada por la ecuación.

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Aplicada a la Tierra proporciona una velocidad de escape de $11,2 \text{ km/s}$; para escapar de la Luna la velocidad es de $2,38 \text{ km/s}$ y la velocidad de escape en el Sol sería de $616,5 \text{ km/s}$.

La Tierra se encuentra rodeada de una atmósfera gaseosa y las partículas de los gases poseen una cierta energía cinética media, debido a la temperatura a la que se encuentran. Para que las partículas pudieran escapar del campo gravitatorio terrestre, tendrían que tener temperaturas de unos 7000 K , sin embargo, en la Luna bastaría con una temperatura de unos 330 K , que por tratarse de un valor relativamente bajo podría justificar una de las causas por las que la Luna carece de atmósfera.

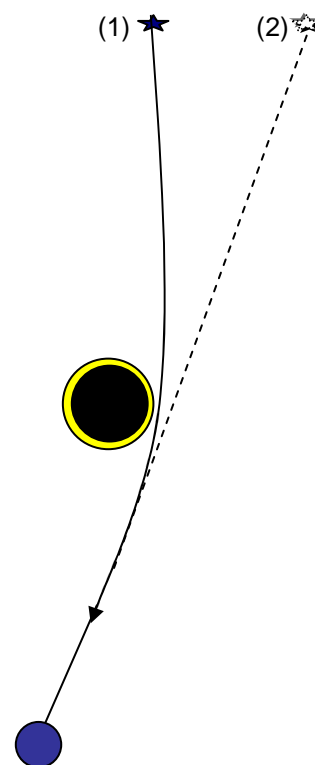
Las partículas se encuentran atrapadas en los campos gravitatorios si su velocidad es inferior a la de escape. Ahora bien cabe preguntarse, ¿podría ser atrapada la luz por un campo gravitatorio?. Sabemos que está formada por fotones que se mueven en el vacío a 300.000 km/s y la respuesta afirmativa o negativa, vendrá determinada según muestra la ecuación anterior, por la relación entre la masa y el radio del astro, el cociente M/R . Tal relación sería:

$$\frac{M}{R} = \frac{v^2}{2G} = \frac{(300\,000 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11}} \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 6,75 \cdot 10^{26} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Se trataría entonces de un objeto que tendría una enorme masa y un pequeño radio y desde luego no podría ser abandonado por ninguna partícula material, ni tan siquiera por los fotones. La luz y las radiaciones electromagnéticas quedarían atrapadas por la gravedad de tales objetos y por esta razón se les llama *agujeros negros*, denominación propuesta por el físico John Wheeler en 1969 y que hasta le fecha se sigue empleando.

Einstein asignó el nombre de fotón a los cuantos de luz (unidades de energía electromagnética que se mueven a la velocidad de la luz) y utilizando sus propias ideas y las de Planck, pudo asociarle una determinada masa. De este modo los fotones se convirtieron en candidatos para ser atrapados por los campo gravitatorios.

Esto era algo que había que probarlo experimentalmente y se pensó en el Sol que al tener una masa muy grande podría actuar sobre la luz procedente de las estrellas y desviar su trayectoria al pasar por sus cercanías. Después de varios intentos, en 1919, desde Sobral en Brasil, y aprovechando un eclipse solar pudo verificarse como las estrellas alineadas con el Sol, aparecían en posiciones virtuales que no les correspondían, explicándose el fenómeno por la curvatura experimentada por los rayos de luz procedentes de estas estrellas, al pasar próximos al Sol. Esta hipótesis quedó de nuevo verificada en 1922, en Australia.



Observando desde la Tierra durante un eclipse de Sol, la Luna oculta el disco solar, permitiendo la contemplación de estrellas que solo pueden ser vistas de noche y en otra época del año. Comparando sus posiciones habituales con las que presentan durante el eclipse, en las que su luz pasa cerca del Sol, se ve que ahora los rayos procedentes de las estrellas se curvan, con lo que se demuestra experimentalmente la hipótesis sobre la curvatura que sufren los rayos de luz en los campos gravitatorios. Los rayos de luz procedentes de la estrella situada en (1) al curvarse cerca del Sol, dan la sensación de que la estrella se encuentra en (2).

La teoría de la relatividad general enunciada por Einstein en 1914 fue utilizada por Karl Schwarzschild en 1918 para resolver el problema considerando un modelo de campo gravitatorio creado por una esfera homogénea y fija, con gran densidad de masa. El espacio se curva en sus proximidades hasta formar un “bucle” en el cual la materia queda atrapada y nada puede salir.

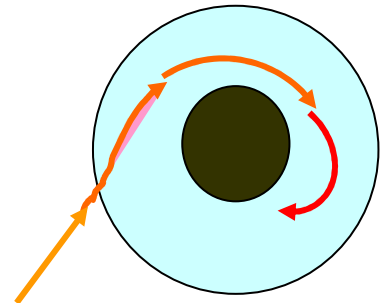
Desde una cierta distancia a su centro, llamada “radio de Schwarzschild” (R_s) nada puede salir al exterior, ni la luz, por lo que se perdería toda información sobre lo que pueda haber en su interior. Desde otra distancia, igual a tres veces el radio de Schwarzschild, hacia el exterior, los cuerpos pueden quedar situados en órbitas alrededor del agujero negro, pero para distancias menores de $3R_s$ todo sería atraído y desaparecería en él. El valor del radio de Schwarzschild para una estrella de masa M y radio R , se puede obtener de la ecuación anterior, resultando $R_s = 2GM / c^2$ donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Para el Sol vale aproximadamente 3 km

En cuanto a la causa que pudiera originar estos objetos se ha propuesto lo que se llama el “colapso gravitatorio”, que consiste en suponer que las estrellas pierden energía por radiación y la masa de su núcleo se va concentrando mas y mas en un espacio cada vez menor hasta que alcanza la densidad necesaria para convertirse en una *enana blanca*, en una *estrella de neutrones* o en un *agujero negro*, dependiendo su estado final del tamaño inicial de la estrella.

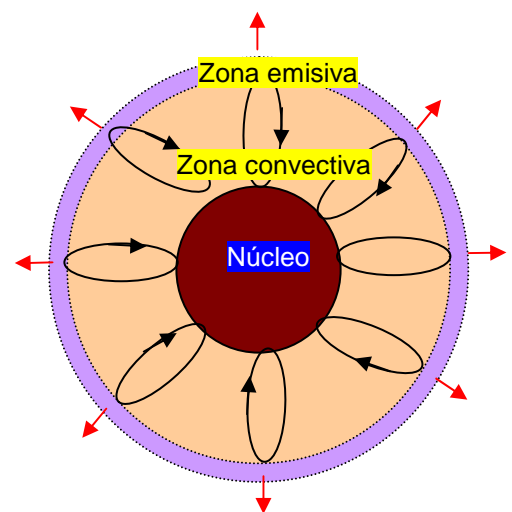
La estructura de una estrella, en un esquema simplificado, consiste en su **núcleo central**, donde se producen reacciones nucleares de fusión que proporcionan altas energías y elevan su temperatura. La **zona “convectiva” o intermedia**, que proporciona el combustible nuclear, el hidrógeno, y la **zona exterior**, estancada, que emite la energía en forma de radiaciones. En las estrellas de menor tamaño, hasta 1,4 veces la masa del Sol, la fusión nuclear produce núcleos de He a partir de los de H y puede llegar a producir núcleos de C, la presión llega a las 10^8 atmósferas, la densidad a los 10^{10} kg/m^3 , y la temperatura desciende hasta los 10^6 K cuando agota su combustible nuclear. En este estado la estrella alcanza su estabilidad, deja de producir reacciones nucleares y emite radiaciones por su elevada temperatura, es una *enana blanca*. A medida que se valla enfriando pasará a ser *enana roja* y morirá convertida en *enana negra*.

Las estrellas con masas hasta 2,5 veces la del Sol siguen un proceso semejante pero más acentuado en sus magnitudes. El horno nuclear puede llegar a fusionar núcleos más pesados en cadenas sucesivas hasta formarse Fe y Ni. La densidad crece hasta 10^{15} kg/m^3 , los protones se convierten en neutrones. El objeto resultante se llama, por esta razón, “estrella de neutrones”.

Cuando el origen está en estrellas de gran tamaño, (puede haber estrellas de masa hasta 100 veces la del Sol), en el horno nuclear se producen reacciones que elevan su temperatura a 10^9 K y entonces empiezan a producirse reacciones de pares electrón-positrón, con emisión de neutrinos y antineutrinos. La situación de la estrella resulta tan inestable que se producen dos fenómenos simultáneos en ella: Una gran explosión que lanza al espacio de forma fulgurante y en poco tiempo una gran cantidad de materiales y radiaciones, este fenómeno se conoce con el nombre de *supernova*. Simultáneamente el núcleo sufre una implosión, (compresión hacia dentro) su tamaño se reduce y su densidad aumenta. Si el radio se hace menor que el límite de Schwarzschild, el objeto resultante será un **agujero negro**.



Cualquier partícula o fotón que se aproxime a un agujero negro a distancia inferior al radio de Schwarzschild quedará atrapada en él.



La emisión explosiva de una estrella emitiendo partículas y radiaciones va acompañada por una implosión de su núcleo. Hacia el exterior se forma una *supernova* y hacia el interior, un objeto masivo que puede ser un *agujero negro*.