

Introducción a la teoría de la Relatividad y los Agujeros Negros

Breve resumen por Pablo J.

a) Introducción :

Vamos a estudiar un objeto que parece de reciente concepción pero que ya fue concebido hace más de dos siglos.

En su concepción inicial, un agujero negro era un objeto con una fuerza de gravedad en su superficie tan grande que nada puede escapar de él; ni siquiera la luz si es que ésta estuviera afectada por la gravedad (cosa que hace 200 años no se sabía). Antes de medir la velocidad de la luz y de la teoría de la [relatividad](#), por medio de la cual se demostró que nada puede sobrepasar la velocidad de la luz, se pensaba que un cuerpo podía alcanzar una velocidad infinita y por lo tanto el agujero negro era un cuerpo en el que la velocidad de escape era infinita también. Esto sólo podía ocurrir cuando se tratara de un astro de masa infinita o de densidad infinita. Se trataba de casos fuera de la lógica y por ello no se le dio importancia al asunto siendo aparcado en el ovido por la mayoría de los científicos.

Pero con la teoría de la relatividad especial la velocidad máxima que puede alcanzar un cuerpo es la de la luz, y entonces se puede pensar que el agujero negro ya puede tener un volumen y una masa finitas, puesto que la velocidad de escape será finita.

Como veremos la relatividad especial nos lleva otra vez a un agujero negro puntual, debido a que la velocidad de escape desde el punto de vista relativista nunca puede superar la velocidad de la luz.

De todos modos ya se había descubierto que la luz no es simplemente una partícula, y por ello no podemos aplicarle la idea de velocidad de escape. Pero es desde el punto de vista de la relatividad general de Einstein cuando se deducen las consecuencias más interesantes para los cuerpos de masa extrema, volviendo a ser factible la idea de un agujero negro no puntual. Aparece el llamado horizonte de sucesos, región del espacio alrededor del agujero cuya curvatura en el espacio tiempo impide que nada escape; ni siquiera la luz.

Además ya no se piensa que el hecho de que un cuerpo colapse hasta ocupar el volumen de un punto sea algo absurdo. Para aclarar ideas comenzaremos viendo como se pueden formar los agujeros negros, continuando luego con un análisis relativista de los agujeros negros.

b) ¿Cómo se forman los agujeros negros?

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 convertiría en una esfera de neutrones y por lo tanto tendría una densidad elevadísima. Sería 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 formaría una nova o una supernova expulsando en la explosión gran parte de su material, con lo que

la presión gravitatoria disminuiría y el colapso podría detenerse. Así se podría llegar a lo que se denomina enanas blancas en las que la distancia entre los núcleos atómicos a 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 colapsaría 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 habría ninguna fuerza conocida que detuviera el colapso, este continuaría hasta convertir la estrella en un punto creándose un agujero negro. Este volumen puntual implicaría 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

c) La 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
$$E_c = \frac{1}{2} m |\vec{v}|^2 \quad (1)$$

y la energía potencial gravitatoria es
$$E_{p_G} = G \frac{m \cdot M}{r} \quad (2)$$

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:

$$v_e = \sqrt{2G \frac{M}{r}} \quad (3)$$

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

$$\frac{M}{r} = \frac{c^2}{2G} \quad (4)$$

como $c=2.99793 \times 10^8$ m/s y $G=6.6732 \times 10^{-11}$ Nm²/kg² obtenemos que

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

que será la relación entre la masa y el radio de un cuerpo esférico para que sea un agujero negro. Con esta relación podemos hallar el radio que deberían tener diversos objetos estelares para ser un agujero negro.

TABLA DE RADIOS CORRESPONDIENTES A AGUJEROS NEGROS

MASA	RADIO
1 sol (2×10^{30} Kg)	3 Km
25 soles (gigantes azules)	75 Km
1000 soles	3000 Km
10^7 soles (núcleo galáctico)	3×10^7 Km
10^{11} soles (galaxia)	3×10^{11} Km

Pero esto es mezclar la teoría de relatividad con la mecánica clásica, ya que la ecuación de la energía cinética de un cuerpo según la relatividad especial es diferente a la clásica:

$$E_c = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \quad (5)$$

Así se obtiene una velocidad de escape relativista (v_{rel}):

$$v_{e(rel)} = c \left(\sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{MG}{rc^2}\right)^2}} \right) \quad (6)$$

Así 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.

d) Relatividad General y 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

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{x}{4\pi} \int \frac{\sigma}{r} dV_0} \quad (7)$$

siendo $x = 8\pi G/c^2$ (G es la constante de gravitación universal)

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

t = supuesto tiempo objetivo (transcurrido en las lejanías del campo gravitatorio)

σ = densidad del astro

V_o = Volumen del astro

r = distancia desde el centro del astro hasta el punto del espacio que estamos analizando.

Entonces sustituyendo x por su valor se obtiene

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{2G}{c^2} \int_v \frac{\sigma}{r} dV_o} \quad (8)$$

y como σdV_o es la masa de una partícula del astro (dm_o), la integral $\int_v \frac{\sigma}{r} dV_o = \frac{1}{r} \int_v dm_o = \frac{M}{r}$ es la masa M del astro dividida por el radio r , se obtiene

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} \quad (9)$$

(ecuación que suele ser deducida actualmente a partir de la [métrica de Schwarzschild](#) para la relatividad general)

y como según la ecuación (3) $2GM/r = v_e^2$ siendo v_e la velocidad de escape clásica a la distancia r del centro del astro, obtenemos

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}} \quad (10) \quad \text{(Se puede hacer otra deducción de esta fórmula, más didáctica, por medio del [principio de equivalencia](#))}$$

De aquí se deduce que *a medida que un cuerpo se acerca a un astro el tiempo transcurre más despacio* para éste cuerpo, en función de la velocidad de escape del astro (desde un punto de vista clásico), de modo que cuando se llegue a una distancia tal que la velocidad de escape clásica sea igual a la velocidad de la luz, el tiempo se detendrá para el objeto situado en ese lugar. O sea para $r=2GM/c^2$ que es el llamado **radio de Schwarchild**.

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

Al atravesar este horizonte el tiempo vuelve a existir pero con componentes imaginarias (el cálculo del tiempo transcurrido en el interior del horizonte de sucesos nos lleva a una raíz 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 dimensión perpendicular tanto a las tres espaciales como a la temporal normal.

Además la teoría 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 desviaría el doble de lo que lo haría si estuviera afectado por la gravedad desde un punto de vista clásico (como partícula). Así Einstein obtuvo realizando algunas aproximaciones que la desviación era:

$$\alpha = \frac{4GM}{rc^2} \quad (11)$$

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 debía 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:

$$v = v_0 \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}}$$

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

Se calcula que para dicho radio la curvatura del espacio sería tal que la luz quedaría 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 produciría en dirección hacia el centro de éste.

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

e) Detección de 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.

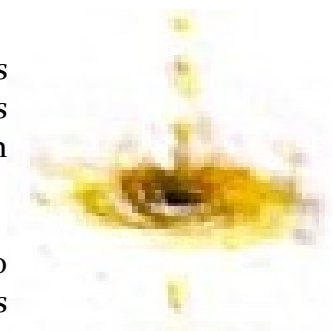
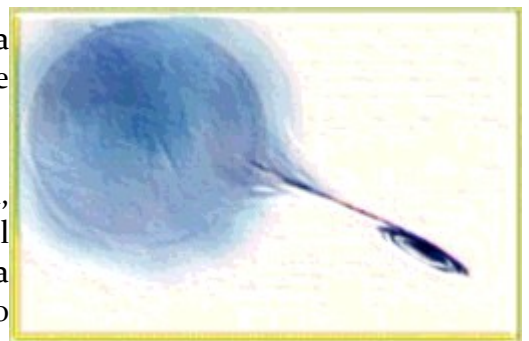
Supongamos un sistema binario de estrellas (dos estrellas muy cercanas girando la una alrededor de la otra) en el cual una de las estrellas es visible y de la cual podemos calcular su distancia a la Tierra y su masa. Esta estrella visible realizará unos movimientos oscilatorios en el espacio debido a 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 unos 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, podría ir cediéndole parte de su masa que caería hacia el agujero negro siendo acelerada a tal velocidad que alcanzaría una temperatura tan elevada como para emitir rayos X. Pero esto también sucedería si se tratara de una estrella de neutrones.

Un ejemplo de objeto detectado que cumple las dos condiciones primeras expuestas es la estrella binaria llamada Cignus-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 los 2'5 masas solares

A parte de esto también hay que tener en cuenta que S. Hawking dedujo que un agujero negro produciría partículas subatómicas en sus



proximidades, perdiendo masa e irradiando dichas partículas, lo cual sería otro modo de detección. Pero no debemos pensar que el agujero perdería masa, ya que un agujero negro de unas pocas masas solares emitiría una radiación inferior a la radiación de fondo del universo, con lo cual recibiría más energía de la que emitiría, y por lo tanto aumentaría su masa.

f) El agujero negro no puntual :

En el apartado sobre la formación de los agujeros negros hablamos de que una estrella podría 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 tardaría 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 sí exista algo que pueda detener este colapso final hacia un punto (si ésto 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 podrían evitar basándonos en el hecho de que [en el horizonte de sucesos el tiempo se detiene](#).

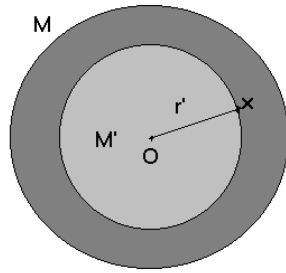
Recordemos que según la relatividad general la velocidad de la luz disminuye (podemos ver una demostración en el apartado [frenando la luz](#) de la sección de [relatividad](#)) a medida que se acerca a una masa (hecho comprobado al enviar y recibir señales de radio a sondas situadas casi detrás del 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 estaría detenido en todo el volumen de astro (el horizonte de sucesos sería una esfera, no una superficie esférica) y por lo tanto el colapso a partir de este punto no ocurriría aún 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 detendría 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 tendría 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

$$\boxed{\frac{M'}{r'} = \frac{c^2}{2G} = K} \quad (12)$$

y por lo tanto si despejamos la masa

$$\boxed{M' = Kr'} \quad (13)$$

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 $s(x)$ 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

$$\boxed{Kr' = M' = \int_v \sigma(x)dV = \int_0^{r'} \sigma(x) 4\pi x^2 dx} \quad (14)$$

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

$$\boxed{\sigma(x) = \frac{K}{4\pi x^2} = \frac{c^2}{8\pi G x^2}} \quad (15)$$

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 (hablo de ello en el apartado sobre [el fondo de microondas](#)), mientras que un observador local que cayera hacia el agujero negro no notaría 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.

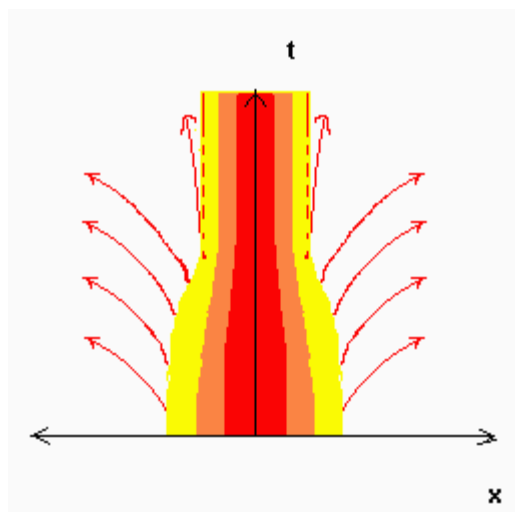
En la siguiente página podemos ver como serían los gráficos espacio-tiempo del colapso de una estrella según el modo clásico y según esta hipótesis.

g) Agujeros en eterna formación, agujeros negros eternos y otros conceptos matemáticos :

Cuando una estrella se colapsa al romperse el equilibrio de presiones, su radio disminuye hasta.... ¿hasta un punto?

Me temo que no.

A medida que se colapsa tenemos que el radio disminuye mientras la masa se mantiene, con lo que los calculos nos dicen que el tiempo va frenando su transcurrir. Como podemos ver en [frenando la luz](#), 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 **en 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 de éste que sigan existiendo en forma de agujeros negros. Serían los **agujeros negros eternos**, existentes desde el principio del tiempo. Estos agujeros negros puede 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 realidad 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 Nathan Rosen en los años veinte. Esto también fué 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. Podemos leer un artículo de Paul Davis en *Scientific American* de septiembre de 2002 y también su libro *"How to Build a Time Machine. Paul Davies. Viking, 2002"*.

h) Túneles en el espacio-tiempo :

La mayoría de los físicos de la época, incluyendo a Einstein, adoptaron una actitud escéptica; y no creyeron que objetos como los agujeros negros pudieran existir en el universo real. Sin embargo, en 1939, los físicos norteamericanos J. Oppenheimer (quien años más tarde lideraría los esfuerzos estadounidenses para producir la bomba atómica) y Hartland Snyder (en ese momento un estudiante de postgrado) demostraron por medio de cálculos detallados que cuando su combustible nuclear se agota, cualquier estrella cuya masa sea al menos tres veces mayor que la del Sol termina por colapsar bajo la acción de la fuerza gravitatoria que ella misma genera. Los cálculos de Oppenheimer y Snyder indicaban que el colapso no se detiene (como sostenían los detractores de la idea de los agujeros negros), sino que continúa hasta que el radio de la estrella se hace inferior al radio crítico y se forma un agujero en el propio espacio-tiempo.

Aún después de la publicación de los hallazgos de Oppenheimer y Snyder, la existencia de los agujeros negros siguió siendo negada por la mayoría de los físicos, principalmente porque la solución de Oppenheimer y Snyder presentaba características que en ese momento fueron catalogadas como "no físicas". Entre ellas, sobresalía el hecho de que para dos valores específicos de una de las coordenadas, ciertas funciones asociadas con la distancia entre dos puntos del espacio-tiempo se hacían divergentes (["El espacio-tiempo y las ecuaciones de Einstein"](#)).

La oposición a la existencia de agujeros negros fue liderada durante algún tiempo por uno de los más grandes científicos de este siglo: John Archibald Wheeler (quien durante los años 50 dirigió el desarrollo de la bomba de hidrógeno). Wheeler sostenía que los cálculos de Oppenheimer y Snyder contenían demasiadas idealizaciones (es decir simplificaciones de los datos a fin de disponer de un modelo susceptible a su tratamiento matemático). Sin embargo, cambió su posición y retiró sus objeciones cuando al rehacer los cálculos de Oppenheimer y Snyder, teniendo en cuenta correcciones provenientes de la física nuclear, logró probar hacia 1958 que estos autores tenían razón al postular que la formación de un agujero era inevitable. Desde entonces, Wheeler se transformó en uno de los líderes en la investigación de objetos colapsados por acción de la gravedad.

Pero subsistían aún las dudas acerca de la existencia de los agujeros negros debido a las divergencias en la geometría del espacio-tiempo ya mencionadas. Los científicos se preguntaban si era esta una característica fundamental del espacio-tiempo de Schwarzschild o más bien era la consecuencia de la incorrecta elección de las coordenadas utilizadas para describirlo. También generaba dudas el

hecho de que la solución predice la existencia de un punto de curvatura infinita (vale decir, un punto en el cual la fuerza gravitatoria es infinita, y el espacio-tiempo deja de existir de acuerdo con la Relatividad General), al que se denomina singularidad.

En 1960, Martin Kruskal y otros, revisaron el asunto utilizando un nuevo sistema de coordenadas, que incluye al anterior, mediante un procedimiento matemático llamado extensión analítica. Lograron demostrar que la solución de Schwarzschild no representa a un único universo sino a dos: uno es el principal o primario, digamos, donde residimos nosotros, y otro, inaccesible, es el secundario, separado del primero por la existencia de la singularidad y aislado del mismo por un horizonte de eventos (ver glosario). La ubicación del horizonte y sus propiedades no habían sido estudiadas durante las primeras etapas del desarrollo de la Relatividad General, debido a que el valor de la coordenada radial a la cual aparece el horizonte se encuentra siempre dentro de los cuerpos (en donde la solución de Schwarzschild no es válida) cuando estos no son suficientemente compactos. Por ejemplo, para una estrella como el Sol, el radio de Schwarzschild se ubica a 3 kilómetros del centro, mientras que el radio solar es de varios miles de kilómetros.

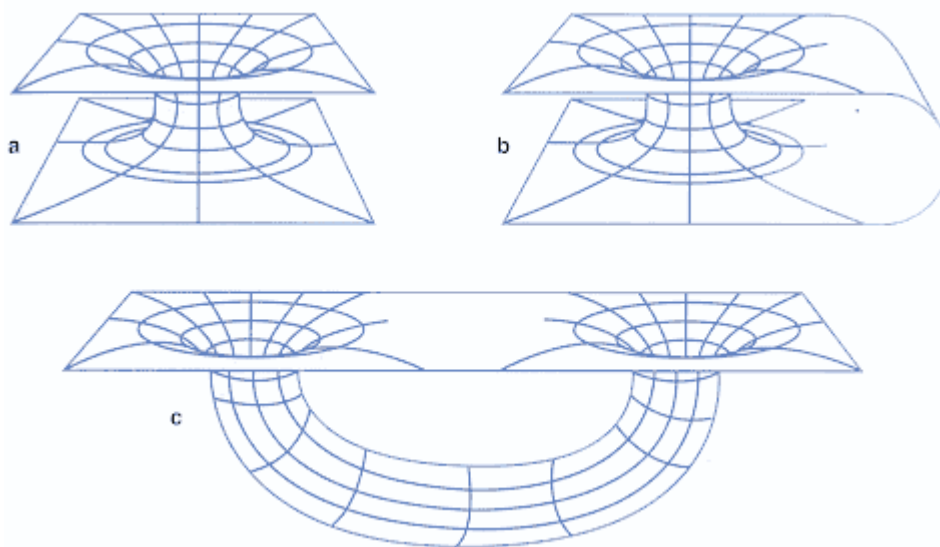


Figura 2. Diferentes topologías de un agujero de gusano. En (a) el túnel conecta dos universos separados, mientras que en (b) y en (c) conecta distintas partes de un mismo universo. Los dos últimos casos muestran cómo el puente puede tener mayor o menor longitud que la distancia de separación que existe entre las bocas cuando esta se mide sobre la lámina que representa el universo.

Solamente cuando los físicos consideraron seriamente la existencia de objetos superdensos, los estudios de la solución de Schwarzschild en este rango de distancias cobraron importancia. Utilizando las coordenadas de Kruskal, resultó posible demostrar que ningún objeto que se desplace a velocidades menores que la de la luz puede evitar caer en la singularidad antes de alcanzar el universo secundario. Aunque existe un "puente" conectando ambos universos (llamado puente de Einstein-Rosen) el problema es que este evoluciona con el tiempo de modo tal que se cierra sobre sí mismo antes de que cualquier objeto pueda atravesarlo. A pesar de ello, el descubrimiento de estas nuevas propiedades de la solución de Schwarzschild despertó el interés en el estudio de estructuras topológicas (es decir, de forma) que presenten puentes o túneles que puedan ser atravesables para unir así distintas regiones del espacio-tiempo (figura 2.a).

Esta idea fue retomada hacia fines de los años 80 por Kip Thorne, titular de la cátedra Feynman en el Instituto Tecnológico de California, cuando fue consultado por Carl Sagan, que se encontraba entonces escribiendo su novela *Contact* ("Contacto"), sobre la posibilidad de utilizar agujeros negros para realizar viajes interestelares. La consulta provocó el interés de Thorne por el tema, quien luego de trabajar un tiempo sobre el asunto, explicó a Sagan que los agujeros negros de Schwarzschild no

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

