

# Viaje a las Estrellas en Agujeros de Gusano

Tonatiuh Matos<sup>\*</sup>  
Fernando Favela Rosales<sup>\*\*</sup>

1 de mayo de 2006

## 1. Introducción

Quien podría haber imaginado que después de tantas historias de ciencia ficción, series futuristas y películas con una excelente gala de efectos especiales acerca de viajes en el tiempo o interestelares, hoy en día nos encontraríamos con trabajo serio en física con el objetivo de realizar tales hazañas.

El origen de lo que en física se conoce como *Agujeros de Gusano*, aunque no comenzó con este nombre, viene desde 1916, poco después de que Einstein publicara su teoría general de la relatividad. Un físico Vienés desconocido, llamado Ludwig Flamm, se fijó en el agujero negro más simple: *el agujero negro Schwarzschild*, y descubrió que las ecuaciones de Einstein permitían una segunda solución, ahora conocida como agujero blanco, que se encuentra conectado a la entrada del agujero negro por un conducto de espacio tiempo. La *entrada* del agujero negro y la *salida* del agujero blanco pueden estar en diferentes partes del mismo universo o en diferentes universos.

Posteriormente, Albert Einstein y su colega Nathan Rosen, publicaron un artículo de título *El Problema de la Partícula en la Teoría General de la Relatividad*, el cual intentaba construir un modelo geométrico de una *partícula* física elemental. El modelo involucraba la representación matemática del espacio físico por un espacio de dos hojas idénticas. La partícula era representada por un *puente* conectando esas dos hojas. Otra característica que aparecía en ese artículo era la inclusión de una densidad de energía negativa, lo que hoy en día aun parece difícil de concebir. Por supuesto el modelo que Einstein y Rosen construyeron fue considerado un fallo, pero la manera en que ellos fallaron fue interesante y presagió muchas de las ideas que actualmente se utilizan en la física de *agujeros de gusano*.

El nombre *agujero de gusano* proviene de la siguiente analogía usada para explicar el fenómeno: imagina que el universo es la superficie de una manzana, y un gusano esta viajando sobre su superficie. La distancia de un lado de la

---

<sup>\*</sup>Departamento de Física, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, A.P. 14-740, 07000 México D.F., México.

<sup>\*\*</sup>Unidad Académica de Física, Universidad Autónoma de Zacatecas

manzana a otro es igual a la mitad de la circunferencia de la manzana si el gusano se queda en la superficie. Pero si en lugar de ello el gusano excava directamente a través de la manzana, la distancia que debe viajar es considerablemente menor.

Los agujeros de gusano fueron presentados al público no especializado en los problemas de la física teórica relativista, cuando Carl Sagan publicó su novela *Contact*. Sagan estaba decidido a mostrar un método plausible para moverse a velocidades mayores que la de la luz y consultó con astrofísicos teóricos sobre el problema. En su novela, Carl Sagan presenta a la astrónoma Ellie Arroway viajando por un agujero de gusano por el cual puede visitar varios lugares de nuestra galaxia, un viaje que le toma tan solo algunas décimas de segundo. Un viaje tan largo en tan corto tiempo. En su tiempo propio, la astrónoma había viajado varias horas, pero para los observadores externos el viaje había sido casi instantáneo, un efecto típico de la relatividad general, un sueño fascinante.

Los modelos sobre los agujeros de gusano existían desde hace tiempo, pero el consenso general era que estos objetos tenían varios problemas: Primero, se creía que los agujeros de gusano eran extremadamente inestables, y una vez creados tenderían a colapsarse antes de poder enviar cualquier mensaje o viajero a través de ellos. Dos, los agujeros de gusano conocidos tenían un garganta muy pequeña, en la que sólo podía pasar una partícula elemental, imposible para el paso de un viajero. Tres, este agujero de gusano está dentro de un horizonte, por lo que las fuerzas de marea del agujero negro, las fuerzas gravitacionales, son tan gigantes que destruirían a cualquier nave o viajero que se acerque al horizonte. Estos problemas convertían a los agujeros de gusano en especulaciones teóricas, casi sin sentido. Por esta razón los físicos consideraban a los agujeros de gusano como entes sin interés realista, y permanecieron casi olvidados por la comunidad.

Después de la novela de Carl Sagan, el físico Kip Thorne del Instituto de Tecnología en California y sus estudiantes de doctorado Michael Morris y Ulvi Yurtsever intentaron demostrar que el agujero de gusano descrito en la novela de Sagan no tenía sentido físico y estudiaron las condiciones necesarias para que un ente así pudiera ser descrito por la teoría general de la relatividad. En una serie de artículos, describieron como crear un agujero de gusano estable (evitando su colapso), con una garganta suficientemente ancha para poder ser atravesado (atravesable) y sin fuerzas de marea tan grandes. Su sorpresa fue que esto si era posible e incluso demostraron que estos agujeros de gusano al mismo tiempo pueden ser usados como máquina del tiempo. Solo tenían un defecto: la materia que los originaba tenía densidad de energía negativa. Mas tarde también se demostró que el agujero de gusano de Thorne y Morris era inestable. Por lo demás, se había dado un paso enorme en la búsqueda de estos objetos fascinantes.

## 2. Los Primeros Trabajos Formales

El interés en los agujeros de gusano atravesables tomó auge posteriormente a la publicación de los artículos de Michael Morris, Kip Thorne y Uri Yurtsever en 1987. Thorne pasó el problema a sus estudiantes Morris y Yurtsever, quienes

averiguaron que tal viaje podría ser posible si un agujero negro pudiese ser mantenido abierto el suficiente tiempo para que algún vehículo pasase a través de él. Ellos concluyeron que para mantener un agujero de gusano se requeriría de materia con una densidad de energía negativa y una presión negativa mayor en magnitud que la densidad de la energía. La solución de Morris-Thorne esta dada por

$$\begin{aligned} ds^2 &= -dt^2 + dl^2 + (l^2 + l_0^2)(d\theta^2 + \sin^2(\theta)d\varphi^2) \\ \sqrt{\frac{8\pi G}{c^4}}\Phi &= \arctan\left(\frac{l}{l_0}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $l_0$  es el ancho de la garganta. Aquí  $\Phi$  es el campo escalar tipo fantasma. Tal materia hipotética es completamente materia exótica, no se tenía conocimiento de su existencia. Aunque tal materia es especulativa, se conocía una manera teórica de producir energía de densidad negativa mediante el efecto Casimir, una manera de producir energía negativa por medio del vacío cuántico. Como fuente de su *agujero de gusano*, se volvieron entonces hacia el vacío cuántico. *El espacio vacío* realmente no existe. En su más mínima escala, el universo no está vacío, sino que hierve con violentas fluctuaciones de formación de partículas elementales. Estas fluctuaciones están muy bien medidas y consisten en la creación de pares de partículas por tiempos en los que no violan ninguna ley física. Esto es posible gracias al principio de incertidumbre. Por otro lado, sabemos que existe una dualidad entre partículas y ondas. A cada partícula se le asocia una longitud de onda y a una onda se le pueden asociar propiedades de partículas. Podemos diseñar una región en donde algunas partículas no “quepan”, tomando la región mas pequeña que la longitud de onda de la partículas. Entonces se puede llevar a cabo el siguiente experimento. Para explicarlo de una manera sencilla, podríamos imaginar crean un espacio vacío en donde se ponen dos placas paralelas tan cerca, que la longitud de onda de algunas partículas es mayor que la distancia entre las placas paralelas. Entonces, fuera de las placas el valor esperado del vacío es 0. Pero dentro de las placas, este valor será menor que 0, ya que habrá menos partículas que afuera. Aquí la densidad de partículas será negativa. Este fenómeno se llama el efecto Casimir y fue medido a mediados de los aos 90. Esta observación cambio entonces nuestra visión sobre la energía negativa, dando lugar a que este tipo de materia con densidad de energía negativa ya no debe de considerarse tan exótica.

Otro lugar en donde se cree que existen agujeros de gusano es a la escala de Planck, es decir, a longitudes menores que  $10^{-34}$ cm. A este nivel de la naturaleza, se cree que ultra pequeños agujeros de gusano están continuamente apareciendo y desapareciendo. El equipo de Thorne sugirió que una civilización lo suficientemente avanzada podría expandir, de alguna manera que aun somos incapaces tan siquiera de concebir, uno de esos pequeos agujeros hasta un tamaño macroscópico añadiéndole energía. Entonces el agujero podría ser estabilizado utilizando el efecto Casimir. Finalmente, las bocas podrían ser transportadas a regiones bastamente separadas en el espacio para proporcionar una forma de comunicación y de viaje más rápido que la de la luz.

Desde la perspectiva de Morris y Thorne existe muchas otras dificultades para la construcción de agujeros de gusano atravesables aunque estuviera disponible un campo o estado exótico que los generara. Esta dificultad es el cambio de topología requerido para la formación de agujeros de gusano. Este cambio de la topología podría no ser permitido clásicamente y no está entendido cuánticamente, es más, podría ser prohibido cuánticamente. El campo exótico podría interactuar muy fuertemente con materia ordinaria, prohibiendo el viaje humano a través del agujero de gusano. Sin embargo, no sabemos si afirmar o refutar estas dificultades, y correspondientemente no podemos excluir los agujeros de gusano atravesables.

### 3. Lo que Hollywood dice

No hay duda que el filme “Contacto” en 1997 causó un enorme impacto al darle un poco más de fundamentación científica a un posible viaje interestelar. Esta película tuvo su fundamento en la novela del mismo nombre escrita por el ya fallecido Carl Sagan en 1985. Sagan basó su historia en lo más avanzado en física teórica de la época y de hecho hasta antes de su muerte trató de que la película fuera fiel a los conocimientos científicos que se tenían hasta entonces. Hay diferencias notables entre la película y la novela, aunque la idea que tratan de transmitir básicamente es la misma, hacernos la pregunta de si estamos solos en el universo.

La historia trata de una Radio Astrónoma, Ellie Arroway, que descubre una señal proveniente de la estrella Vega la cual contiene un mensaje de como construir una máquina para poder realizar un viaje interestelar. Aquí es donde aparece una de las diferencias con el libro, ya que en el filme no da una buena descripción de la construcción de la máquina, además de que el viaje lo realizan 5 personas (Ellie, Devi, Eda, Xi y Vaygay) y no una como en la película. En el libro pasa algo fascinante que no pasa en la película. El libro relata que para cuando se lleva a cabo el viaje ya existía una teoría de gran unificación creada por uno de los tripulantes, Eda, quien es un musulmán de origen Nigeriano.

Algo más por lo que valdría la pena leer el libro es porque es más interesante el viaje interestelar que realizan los tripulantes en el libro que en la película, ya que los viajeros entran y salen de agujeros de gusano sin ser deformados por las fuerzas que existen ahí, llegan al centro de la galaxia y contemplan lo que llamaron el *Grand Central*, por ser el lugar donde llegaban las naves de aquellos seres inteligentes.

Un número bastante conocido también hace su aparición en este libro y juega un papel muy importante. Se trata del número  $\pi$ , el cual según los veganos contiene oculto un mensaje en once dimensiones. Supuestamente si calculas  $\pi$  con diez a la vigésima potencia cifras, ocurre que desaparecen los números fortuitos, y durante un periodo increíblemente prolongado se obtiene sólo una larga serie de unos y ceros. Por último se interrumpen y se vuelve a la secuencia de números al azar donde la cantidad de ceros y de unos es producto de once de los números primos, los cuales a la vez representan el mensaje, que aun no

han descifrado.

Tanto la novela como la película guardan bastante similitud con lo que es el proyecto Fénix, en ambos casos la directora del proyecto es una mujer: en la ficción Eleanor Arroway (Jodie Foster en la película) y en la realidad la astrónoma Jill Tarter. Por otro lado la evolución histórica es similar, en la primera parte de la historia Ellie lleva a cabo el proyecto S.E.T.I. con el sustento del gobierno, hasta que la subvención es cortada y el proyecto pasa a ser sostenido por aportaciones privadas. En la realidad el proyecto H.R.M.S. de la NASA acabó por cortes presupuestarios, al que le sucedió el proyecto Fénix. Otro aspecto basado en la realidad es el compañero ciego de Ellie en la película, Kent Clark; en la realidad se trata del también ciego, Kent Cullers, que de hecho estuvo a punto de interpretar su propio papel en la película.

Otra película que también incluye en su trama un viaje interestelar es *Star-gate* llevada a la pantalla en 1994, la cual podemos resumir de la siguiente manera. Se descubre en una excavación en Egipto lo que parece ser una gigantesca rueda de metal. De una manera misteriosa, cuando se alinea cierta secuencia de símbolos correctamente, se abre el portal para un viaje a un planeta desértico (al “otro extremo de la galaxia”), donde un grupo de descendientes de humanos se mantienen como esclavos de un extraterrestre, que resulta ser el Diós egipcio Ra. El dispositivo tiene las características (ficticias) para ser un agujero de gusano, y el viaje que realizan a través de él es similar al que se realiza en la película *Contact*.

En la actualidad muchas personas piensan que “una civilización avanzada podría manipular los agujeros negros para hacer viajes interestelares o en el tiempo”. Pero la verdad es que por ahora, los terrícolas somos incapaces de por lo menos predecir como sería un viaje dentro de éstos hipotéticos túneles de espacio-tiempo.

## 4. Condiciones de Energía

Hay al menos siete tipos de condiciones de energía normalmente considerados en relatividad general clásica. Estas son: la nula, débil, fuerte y dominante, y las condiciones de energía promediadas: nula, débil y fuerte. Pero aquí solo daremos una breve descripción de las cuatro primeras ya que son fundamentales para la postulación de posibles fuentes de sustentación de los *agujeros de gusano*. Comencemos con la condición de energía nula la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\rho + p_j \leq 0$$

donde  $\rho$  es la densidad de energía, que incluye todos los tipos, y  $p_j$  son las presiones principales. Ambos, la densidad de energía y las presiones, son componentes de la diagonal del tensor de energía momento.

La condición de energía débil matemáticamente se expresa de la siguiente manera

$$\rho \geq 0$$

esencialmente dice que la densidad de energía local es definida positiva; i.e., cada observador local mide una densidad de masa positiva.

La condición de energía fuerte

$$\rho + \sum_j p_j \geq 0$$

cuando es acoplada a la geometría del espacio-tiempo vía ecuaciones de Einstein. Básicamente dice que la gravitación es siempre una fuerza atractiva. Sin embargo, una violación de esta condición es justamente la energía oscura del universo, que representa el 73 % de la materia del universo.

Como su nombre implica, la condición de energía débil es una condición mucho más débil a imponer sobre el espacio-tiempo que la condición de energía fuerte.

Por último, la condición de energía dominante dice que la densidad de energía medida localmente es siempre positiva. La condición de energía dominante implica la condición de energía débil, y de este modo también la condición de energía nula, pero no necesariamente la condición de energía fuerte.

Estas condiciones de energía serían violadas por materia con densidad de energía negativa, pero son el fundamento clave de un número de teoremas importantes, como el “teorema de la masa positiva”, el cual dice que objetos hechos de materia que satisface la condición de energía dominante nunca pueden ser antigravitantes (no puede repeler otros cuerpos gravitacionalmente).

Sin embargo, se sabe que los campos cuánticos pueden tener densidad de energía negativa, violando las condiciones de energía. Tal estado se volvió realidad en el laboratorio como resultado de la técnica de óptica no-lineal de *squeezing*. Un ejemplo de esta violación es un “estado de vacío comprimido” de una onda electromagnética viajera que oscila atrás y adelante entre densidad de energía positiva y densidad de energía negativa. Cuando la densidad de esta onda es promediada en el tiempo esta tiene densidad de energía positiva.

En la actualidad se conoce que muchos sistemas físicos, tanto de manera teórica como experimental que violan una o más de las condiciones de energía. Algunos ejemplos, tal vez los más típicos son la energía oscura del universo y el efecto Casimir. Pero se espera que estas condiciones de energía no se cumplan en sistemas físicos cuánticos o tal vez en sistemas astrofísicos.

## 5. El Efecto Casimir

El efecto Casimir también puede ser entendido mediante la idea de que en presencia de metales conductores y dieléctricos se altera el valor esperado en el vacío de la energía del campo electromagnético. Dado que el valor de esta energía depende de las formas y posiciones de los conductores y dieléctricos, el efecto Casimir se manifiesta como una fuerza entre tales objetos, la fuerza es negativa, indicando que hay atracción: acercando las placas, la energía es reducida.

Uno de las primeras pruebas experimentales de la existencia del efecto Casimir fue conducida por Marcus Spaarnay en Phillips en la ciudad de Eindhoven, en 1958, en un delicado y difícil experimento, con resultados en concordancia general con la teoría.

El hecho de que el efecto casimir es real, es evidencia experimental de que las condiciones nula, débil, fuerte y dominante son algunas veces violadas por efectos cuánticos. El efecto en los hechos es diminuto. Para platos reales, la masa de los platos por sí misma es siempre mucho mayor que la energía Casimir. Así, un par de platos conductores reales en general no violará las condiciones promediadas de energía. Esta observación nos sugiere que una dependencia ciega sobre la energía Casimir para sustentación de *agujeros de gusano* atravesables podría no ser un esquema provechoso como se pudiera desear. Es posible, pero difícil de realizar con la tecnología actual.

## 6. Agujeros Negros

El horizonte de un agujero negro es la superficie que separa el interior de la región en donde todo queda atrapado por la gravedad del agujero, es esa región que no se puede comunicar con el universo externo debido a que ni la luz puede salir de ella. En el horizonte de un agujero negro de masa  $M$ , enormes fuerzas gravitacionales producen enormes aceleraciones relativas entre la cabeza y pies de un aventurero de altura  $L$ , aceleraciones con magnitud  $\sim L(2GM/c^3)^{-2} \sim (10 \text{ gravedades terrestres}) \times (L/1 \text{ m}) \times (M/10^4 \text{ masas solares})^{-2}$ . Sin embargo, los agujeros negros que se conocen se encuentran en los centros de las galaxias, y suelen ser de cientos de miles o millones de masas solares. Por ejemplo, si un agujero es mas masivo que  $10^4$  soles, implicaría que el agujero negro tiene un horizonte con circunferencia  $4\pi gM/c^2$ , lo cual es mas largo que  $10^5$  km. El aventurero sería aniquilado por las gravedad incluso antes de alcanzar el horizonte. Un agujero tan masivo y largo no se ajustaría a la mayoría de los escenarios de ciencia ficción.

Un horizonte de agujero negro es una *membrana* de un solo camino, las cosas pueden caer, pero nada puede emerger. Así, un viaje de ida y vuelta esta prohibido; e incluso en un viaje solo de ida el objeto en el otro extremo, del cual el aventurero emerge, no puede ser un agujero negro. Se ha especulado que podría ser un agujero blanco.

Todos los objetos conocidos como soluciones a las ecuaciones de Einstein que podrían existir al otro extremo (como los mencionados agujeros blancos) poseen *horizontes de eventos pasados* o *antihorizontes*, i.e., superficies fuera de las cuales objetos pueden emerger pero nada puede ingresar. Tales antihorizontes son conocidos a ser altamente inestables ante pequeñas perturbaciones.

## 7. Agujeros de Gusano de Energía Fantasma

Ahora es generalmente aceptado que el universo esta experimentando una fase acelerada de expansión. Explicar esta aceleración cósmica es uno de los problemas más desafiantes de la cosmología actual. A la materia o energía causantes de esta expansión acelerada se le ha llamado *energía oscura*. A la fecha se han propuesto muchos candidatos responsables de esta expansión, algunos ejemplos de modelos de energía oscura son la constante cosmológica positiva, los campos de quintaesencia, gravedad modificada, generalizaciones del gas de Chaplyng, entre otros. Los modelos de energía oscura están parametrizados por una ecuación de estado dada por  $p = w\rho$ , donde  $p$  es la presión espacialmente homogénea y  $\rho$  es la densidad de energía oscura. Para la expansión cósmica se requiere un valor de  $w < -1/3$ . Dentro de estas propuestas se encuentra aquella donde  $w < -1$ , la cual ha adquirido mucha aceptación últimamente dentro de los cosmólogos. Es una forma exótica específica de energía oscura denotada como *energía fantasma*. La razón de tal aceptación es que los últimos resultados de las observaciones astronómicas, incluso de observaciones combinadas independientes, parecen favorecer este tipo de modelos, sobre los modelos de quintaesencia y otros. Vamos a platicar brevemente de estas observaciones. A finales del siglo pasado, usando observaciones de las explosiones de supernovas del tipo Ia, dos grupos de astrónomos lograron demostrar que el universo se esta expandiendo aceleradamente. En sus primeros aos, los astrónomos utilizaron una muestra de alrededor de 40 supernovas para llegar a esta conclusión. En la actualidad, 2006, ya existe una muestra de unas 200 supernovas observadas, una muestra con la que se puede hacer una estadística mas confiable de la expansión acelerada del universo. Los resultados de esta muestra parecen indicar que la constante  $w$  no solo es menor a  $-1/3$ , sino  $w \leq -1$ . Estas observaciones de las supernovas se combinan con las últimas observaciones de la Prueba Wilkinson de Anisotropía de Microondas (WMAP por sus siglas en inglés) un satélite diseado para medir anisotropía de la radiación de Microondas Cósmica de Fondo (CMB) con gran precisión. Sus observaciones apuntan también a este valor para la constante  $w$ . En la actualidad este resultado es una especulación y debe tratarse con mucho cuidado. Pero la *energía fantasma* es justo el tipo de energía que se necesita para formar agujeros de gusano, lo que implicaría la existencia probable de estos objetos y por tanto, la probable existencia de “autopistas” interestelares o intergalácticas en el universo. Esta posibilidad es tan fascinante, que vale la pena investigarla.

La *energía fantasma* posee propiedades peculiares como la violación de la condición de energía nula y una densidad de energía infinitamente creciente, además de que la termodinámica de la *energía fantasma* lleva a una entropía negativa. Como ecuación de estado de la *energía fantasma*,  $p = w\rho$  con  $w < -1$ , esta energía viola la condición de energía nula,  $p + \rho < 0$ , el ingrediente fundamental para sustentar *agujeros de gusano* atravesables. Si la energía oscura es en realidad *energía fantasma*, se tiene a la mano una posible fuente para espacio-tiempo exóticos que crean *agujeros de gusano*. De hecho, esta posibilidad ha sido recientemente explorada, y fue mostrado que los *agujeros de gusano* atrav-



esables pueden ser teóricamente sustentados por *energía fantasma*. Sin embargo, una sutileza necesita ser apuntada. La noción de *energía fantasma* es aquella de un fluido distribuido homogéneamente.

Otro escenario interesante es que debido al hecho de la expansión acelerada del universo, *agujeros de gusano* microscópicos podrían ser naturalmente crecidos de las construcciones submicroscópicas que originalmente se extendieron por el vacío gravitacional.

El WMAP recientemente ha confirmado que el universo esta compuesto de aproximadamente 70% de energía oscura. Los *agujeros de gusano* atravesables de *energía fantasma* tienen implicaciones cosmológicas y físicas trascendentales. Aparte de ser usados como atajos interestelares, civilizaciones muy avanzadas podrían utilizar estas maquinas para convertirlos en máquinas del tiempo. Esto es un tópico problemático y depende del punto de vista, ya que estas maquinas del tiempo probablemente impliquen la violación de la causalidad. Estas maquinas funcionan de la siguiente forma. En un escenario especulativo, uno podría imaginar un *agujero de gusano* microscópico con un de sus bocas en un universo expandiéndose y la otra en un universo contrayéndose. Como la primer boca estaría expandiéndose y la segunda contrayéndose, un desplazamiento temporal (*time-shift*) sería creado entre las dos bocas, transformando el *agujero de gusano* en una máquina del tiempo, así que el viajero en trayecto a través del *agujero de gusano* antes del *big rip* sería trasportado a su futuro. Por otro lado, las implicaciones cosmológicas son también extremadamente interesantes. Para dar una descripción de ello, comenzaremos por hablar un poco del *big rip* (el gran desgarre). El *big rip* es una hipótesis cosmológica acerca del destino final del universo, en el cual los elementos del universo, de galaxias a átomos, están progresivamente despedazándose por la expansión del universo.

## 8. Resultados Recientes

Uno de los mayores problemas que enfrentan las soluciones tipo *agujero de gusano* es su estabilidad. Por construcción, las soluciones de este tipo son atravesables, esto es, una partícula de prueba puede ir de un lado de la garganta a el otro en un tiempo finito, medido por un observador en la partícula de prueba y por uno lejos de ella, y sin enfrentar las grandes fuerzas de marea. Sin embargo la estabilidad de la garganta de los *agujeros de gusano* fue recientemente estudiada numéricamente por Shinkay y Hayward, ellos mostraron que los *agujeros de gusano* propuestos por Thorne, cuando son perturbados por un campo escalar con tensor de energía-momento definido con el signo usual, esto es sin utilizar materia exótica, el *agujero de gusano* colapsa posiblemente hacia un agujero negro, la garganta se cierra.

Intuitivamente es claro que una solución de tipo rotante tendría más posibilidades de ser estable. Esta conjetura proviene de de la siguiente observación. Un trompo es estable si rota, pero inestable si se encuentra estático, lo mismo pasa con una bicicleta. La idea entonces es usar las técnicas de generación de soluciones a las ecuaciones de Einstein desarrolladas a finales de los 80's, donde

fue posible derivar la solución de Kerr comenzando de la solución de Schwarzschild de las ecuaciones de Einstein. Así fue que un grupo de investigadores de la UNAM y el Cinvestav pensó en usar las mismas técnicas y aplicarlas a los *agujeros de gusano* propuestos por Ellis y Thorne. El resultado es muy halagador, se obtiene una solución que contiene un parámetro rotacional, es decir, una métrica que representa un *agujeros de gusano* rotando. La solución se puede escribir como:

$$\begin{aligned}
ds^2 &= -f (c dt + JM \cos \theta d\varphi)^2 \\
&+ \frac{1}{f} [dl^2 + (l^2 - 2ll_1 + l_0^2) (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)], \\
\sqrt{\frac{8\pi G}{c^4}} \Phi &= \sqrt{2 + \frac{\phi_0^2}{2}} \left( \lambda - \frac{\pi}{2} \right)
\end{aligned} \tag{2}$$

Aquí la función  $f$  esta dada por

$$\begin{aligned}
f &= \begin{cases} \exp(\lambda - \frac{\pi}{2}) & \text{para } l > l_+ \\ 4 \frac{d e^{\phi_0 (\lambda - \frac{\pi}{2})}}{J^2 + d^2 e^{2\phi_0 (\lambda - \frac{\pi}{2})}} & \text{para } l_- \leq l \leq l_+ \\ \phi_1 \exp(\lambda + \frac{\pi}{2}) & \text{para } l < l_- \end{cases} \\
\lambda &= \arctan \left( -\phi_0 \frac{l}{2M} \right)
\end{aligned} \tag{3}$$

donde  $l_+$  y  $l_-$  repectivamente son los radios de la estrella rotante de cada lado de la garganta, en cada universo conectado por el *agujero de gusano*. En ésta última sulución,  $J$  es el momento angular de rotación del *agujero de gusano* y  $d$  es una constante dada por  $d = 4\sqrt{4 - J^2} + 8 - J^2$  y toma valores entre 2 y 4.  $M$  es la masa de la región rotante, por lo que  $2M$  es el radio de Schwarzschild de la solución, es decir, el radio del horizonte de un hoyo negro de masa  $M$ . Por ejemplo, si una estrella de campo escalar fantasma tiene un momento angular muy pequeño como  $J = 10^{-10}$ , entonces  $\phi_1 \sim 1,4 \times 10^5$  si la carga escalar de la estrella esta dada por  $q_\phi \sim 0,3M m_{Plank}$ . Para una estrella con una gravedad como la de la tierra, para que una viajero terrestre la pueda atravesar, la carga es equivalente a  $q_\phi \sim 0,003 m_{Plank}$  por metro. En este *agujero de gusano*, un observador en nuestro universo vería que una nave viajando a 1 kilometro por hora en el otro universo dentro del *agujero de gusano*, recorrería  $1,4 \times 10^5$  kilometros en  $1,4 \times 10^{-5}$  horas. Una nave así podría alcanzar regiones muy lejanas, como en la película *Contact*. Sólo que ahora no se trata de ciencia ficción totalmente, sino de una solución exacta de las ecuaciones de Einstein que tiene como fuente energía fantasma, un candidato muy probable a ser el 73% de la materia del universo.

La suposición que se hace con respecto a la formación de los *agujeros de gusano*, es que alguna fluctuación de campo escalar colapsa, de tal manera que forma una configuración de campo escalar rotante. Esta configuración tiene tres

regiones; la interior, donde la rotación es diferente de cero, y dos regiones exteriores, una en cada lado de la garganta, donde la rotación se detiene. Las fronteras internas de esta configuración están definidas donde la rotación desaparece. El campo interior es la fuente del *agujero de gusano* y ellos proponen que su rotación ayudará a evitar que la garganta sea inestable. Esta es la primer solución de este tipo, las otras soluciones conocidas en la literatura, solo describen la geometría posible del *agujero de gusano* rotante, sin resolver las ecuaciones de campo completas con una fuente de materia específica. Los autores consideran que el contar con una solución exacta de este tipo ciertamente contribuirá a tener un mejor entendimiento sobre los procesos físicos que ocurren en esas regiones, sugiriendo que clase de observaciones deberían ser hechas para probar la existencia o no existencia de los *agujeros de gusano* en el universo.

Cada vez que observamos el universo en alguna región desconocida, encontramos sorpresas. Los *agujeros de gusano*, objetos que habían permanecido como entes exóticos durante todo este tiempo, ahora parecieran tener algo de realidad, al menos ya no son impensables. Es así como tal vez se este abriendo otra página de la historia de la ciencia. Cuando iba a pensar Sir J. J. Thomson cuando observaba los rayos catódicos, que estos experimentos iban a ser la base para trasladar imágenes entre dos regiones distantes? Cuando se imagino Wien que con sus experimentos se darían las bases para las computadoras? Si las ecuaciones de Einstein son válidas y la energía oscura es tipo fantasma, la posibilidad de viajes por nuestra galaxia e incluso a lo largo de todo el universo, podía ser algo viable. Por su implicaciones tan extraordinarias, el sólo hecho de una pequeña posibilidad de la existencia de estos objetos, nos da una razón para continuar con esta fascinante investigación.

## Referencias

- [1] M. Visser, *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking* (American Institute of Physics, New York, 1995)
- [2] M.S. Morris and K.S Thorne, Am. J. Phys. **56**, 395 (1988)
- [3] M.S. Morris, K.S Thorne and U. Yurtsever, Phys. Rev. Lett. **61**, 1446 (1988)
- [4] F. J. Tipler, Phys. Rev. D **17**, 2521 (1978)
- [5] A. Einstein and N.Rosen, Phys. Rev. **48**:73-77,1935
- [6] L. Flamm. Beitrage zur Einsteinschen Gravitationstheorie. Phys. Z., 17:448-454, 1916.
- [7] F.S.N. Lobo, Phys. Rev. D **71**084011(2005)
- [8] F.S.N. Lobo, Phys. Rev. D **71**124022(2005)
- [9] T. Matos and D. Núñez, *Rotating Scalar Field Wormhole* Class.Quantum.Grav. en prensa.