

Muerte de una estrella: Los cuerpos oscuros de Laplace

Alberto Jiménez Gutiérrez,
Sarahi Casas Serrano,
David Pérez Bifano,
Víctor Alexis Escobedo Nájera,
Aurora Solar Garcia
Preparatoria 2 de octubre de 1968.
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
email: pablenko@outlook.com

Índice

1. El rol de la gravedad	3
2. Cuerpos oscuros de Laplace	4
3. La detección de hoyos negros	4
3.1. Hoyos negros en sistemas binarios	5

Resumen

El siguiente trabajo presenta una revisión de los modelos que describen la muerte de las estrellas desde un punto de vista relativista. Clasificamos las estrellas utilizando el principio de exclusión de Pauli, el límite de masas de Chandrasekhar y el radio de Schwarzschild. Recurrimos a los trabajos del Dr. Shahn Hacyan de la colección "La ciencia desde México". Los cálculos más elaborados los solventamos usando la paquetería Wolfram Mathematica. Este trabajo de divulgación es elaborado por estudiantes del club de ciencias de la Preparatoria "2 de Octubre de 1968" del nivel medio superior de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

1. El rol de la gravedad

El punto de vista más general aceptado por los físicos hasta el momento, es que uno puede dividir la discusión acerca del universo en dos partes. La primera es la cuestión de que las leyes locales se satisfacen en distintos campos de la física, usualmente expresadas en forma de ecuaciones diferenciales. En la segunda, está el problema de las condiciones de frontera para estas ecuaciones y la naturaleza global de sus soluciones. Esta parte abarca, en cierto sentido la cuestión de los límites del espacio-tiempo. Ambas partes podrían no ser independientes. De hecho se ha sostenido que las leyes locales están determinadas por la estructura a gran escala del universo.¹ Al respecto, adoptaremos un enfoque menos ambicioso: tomaremos las leyes físicas que han sido determinadas experimentalmente, y veremos lo que estas leyes implican acerca de la estructura a gran escala del universo. Resulta evidente que hay una gran extrapolación en suponer que las leyes físicas que uno determina en laboratorio, debieran aplicarse a otros puntos del espacio-tiempo donde las condiciones pueden ser muy diferentes. Si estas leyes fallaran, debieramos considerar la existencia de otros campos físicos que contienen estas leyes locales, pero cuya existencia todavía no se ha detectado en los experimentos, debido a que variarían muy poco en un región tan pequeña como nuestro sistema solar. De hecho, la mayoría de los resultados debieran ser independientes de la naturaleza específica de las leyes de la física, más bien implicarían ciertas propiedades generales, tales como la descripción del espacio-tiempo descritas por la geometría psuedo-Riemanniana del espacio-tiempo.

Las interacciones fundamentales en la actualidad que conoce la física se puede dividir en cuatro clases: las interacciones nucleares fuerte y débil, el electromagnetismo y la gravedad. De estas, la gravedad es por mucho la más débil (la relación entre la fuerza gravitacional en comparación con la fuerza eléctrica en un átomo de hidrógeno es del orden de $\sim 10^{-40}$). Sin embargo, ésta juega un papel dominante en la conformación de la estructura a gran escala del universo. Esto es debido a que las interacciones fuerte y débil tienen un rango de corto alcance ($\sim 10^{-13}$ cm o menos), y aunque el electromagnetismo es una interacción de largo alcance, la repulsión de cargas es muy equilibrada casi idéntica, por lo que respeta a las masas de dimensiones macroscópicas, debido a la atracción de cargas opuestas. La gravedad por otro lado parece ser siempre atractiva. Así, el campo gravitacional de todas las partículas que conforman un cuerpo macroscópico, produce un campo que domina sobre todas las demás fuerzas.

¹Esta visión, es generalmente asociada a Mach, y recientemente ha sido desarrollada por Dirac (1938), Sciama(1953), Dicke(1964), Hoyle, Narlikar(1964) y otros

2. Cuerpos oscuros de Laplace

La gravedad no solo es una fuerza dominante a grán escala, sino que es una fuerza que afecta a cada partícula de la misma forma. Esta universalidad fue reconocida por primera vez por Galileo, quién encontró que cualquiera dos objetos caen a la misma velocidad. También se ha observado que la luz es desviada por campos gravitacionales. Debido a que las señales no pueden viajar más rápido que la luz, la gravedad entonces determina la estructura causal del universo, es decir, determina aquellos acontecimientos del espacio-tiempo que pueden estar relacionados causalmente entre sí.

Estas propiedades de la gravedad conducen a severos problemas, si para una cantidad lo suficientemente grande de materia se concentra en una región, ésta, podría desviar luz de la región lo suficiente que, de hecho, resulta ser arrastrada hacia adentro. Esta situación fué planteada en 1798 por Laplace quién apuntó que un cuerpo de una densidad similar a la del sol, pero 250 veces su radio deberá ejercer un campo gravitacional tan fuerte que la luz no puede escapar de su superficie, Esto resulta tan impresionante que regresaremos a él en el apéndice.

Uno puede expresar el arrastre de luz por un cuerpo masivo más precisamente usando la idea de Penrose de superficies cerradas atrapadas. Consideremos una esfera de radio \mathcal{T} que rodea. Al mismo instante \mathcal{T} emite un flash de luz. Un instante de tiempo t después, los frentes de onda entrante y saliente \mathcal{T} forman dos esferas de radio \mathcal{T}_1 y \mathcal{T}_2 respectivamente. En una situación normal, el área de \mathcal{T}_1 debe ser menor que \mathcal{T} pues \mathcal{T}_1 representa el área entrante y al área de \mathcal{T}_2 , más grande que la \mathcal{T} . Si embargo, si una cantidad muy grande de materia se encierra dentro de \mathcal{T} , las áreas de \mathcal{T}_1 y \mathcal{T}_2 deben ser menores que las de \mathcal{T} . La superficie de \mathcal{T} se dice que debe ser una superficie atrapada. Conforme t incrementa, el área de \mathcal{T}_2 se hace más y más pequeña manteniendo a la gravedad atractiva, es decir siempre que la densidad de energía de la materia no se convierta en negativa. Ya que la materia al interior de la esfera \mathcal{T} no puede viajar más rápido que la luz, debe ser atrapada dentro de una región cuya frontera decrece dentro de un tiempo finito. Esto sugiere que algo va muy mal. En realidad muestra que en esta situación, una singularidad espacio-temporal debe ocurrir, para ciertas condiciones razonables.

3. La detección de hoyos negros

Los hoyos negros no emiten luz y ninguna otra señal; sólo se manifiestan por medio de su atracción gravitacional. La materia atrapado por un

hoyo negro puede llegar a liberar enormes cantidades de energía antes de ser absorbida definitivamente. Este proceso no solo delata la presencia de un hoyo negro, sino que puede ser la clave para explicar un gran número de fenómenos misteriosos del universo.

Uno de los principios fundamentales de la física es la conservación de la energía. La energía no puede crearse ni desaparecer, pero sí puede cambiar de forma. Una forma de energía es el calor, que es la manifestación macroscópica del movimiento de los átomos. Consideremos ahora una estrella rodeada de una nube de gas, el gas cae sobre la estrella y se calienta por la fricción entre sus partes (Por los choques entre sus moléculas). En este ejemplo la energía gravitacional se convierte en calor. El proceso por el que un cuerpo cósmico, como una estrella, atrae gravitacionalmente y absorbe el gas de sus alrededores ha sido llamado “acreción” por los astrofísicos. Este es un fenómeno bastante frecuente y de efectos muy interesantes. El caso más extremo, en cuanto generación de energía, es el de la acreción en un hoyo negro. Si un cuerpo cae libremente a un hoyo negro, puede alcanzar velocidades cercanas a la luminosa en el momento anterior a su caída en el hoyo. Si, por el contrario, la caída del cuerpo es frenada por algún tipo de fricción, la energía gravitacional del cuerpo se convierte en calor. En el caso de un gas que es atraído por un hoyo negro la cantidad de energía liberada en forma de calor llega a ser un factor importante de la energía en forma de masa que posee el gas (según la fórmula $E = mc^2$). Los astrofísicos han calculado que la acreción en un hoyo negro puede ser un mecanismo para generar energía aun más eficiente que la fusión nuclear, en la que “sólo” un 4% de la masa del hidrógeno se libera en forma de energía. Por supuesto un hoyo negro debe de estar formado por una gran cantidad de gas para que se produzca una acreción.

3.1. Hoyos negros en sistemas binarios

La mayoría de las estrellas se encuentran formando grupos de dos o más, amarradas entre sí por su mutua atracción gravitacional, las estrellas aisladas como el sol son más bien la excepción. Es frecuente que dos estrellas formen un sistema binario, en el que cada una gira alrededor de la otra. En algunas ocasiones, las dos estrellas se encuentran tan cercanas entre sí que sus atmósferas se tocan y llegan a intercambiar materia; en este último caso, diversos fenómenos interesantes ocurren por el fenómeno de acreción de la materia de una estrella por su compañera.

En un principio se puede dar el caso de que una de las estrellas de un sistema binario sea mucho más masiva que las otras y, en consecuencia, evolucione más rápidamente pasando por todas las fases de la vida de una estrella hasta terminar en una supernova y, posteriormente, en un hoyo negro. Resultará, entonces, un sistema muy peculiar en el que un hoyo negro y una estrella normal giran uno entorno de otro por su atracción gravitacional. Las estrellas

suelen arrojar cantidades considerables de gas de sus atmosferas al espacio por la presión de su radiación. En nuestro sistema planetario, los efectos del llamado viento solar son bien conocidos por los astrónomos y geofísicos, pero, en muchas estrellas, los vientos estelares pueden ser más intensos que en el caso del sol. También, como señalamos anteriormente, las estrellas tienden a crecer bastante al final de sus vidas, tornándose en gigantes rojas y perdiendo parte de su atmósfera.

Consideremos, pues, un sistema binario formado por un hoyo negro y una estrella normal, con la peculiaridad de que ambos cuerpos se encuentran muy cercanos entre sí. Si la estrella normal está arrojando parte de su atmósfera por el mecanismo de viento estelar, o está creciendo, entonces una fracción de ese material es atrapada por un hoyo negro. Este fenómeno de captura puede generar enormes cantidades de energía.

Debido a la atracción gravitacional y a la rotación del sistema, el gas de la estrella fluye por una zona pequeña de su atmósfera, localizada precisamente frente al hoyo negro, y no cae directamente en este, sino que gira a su alrededor formando un disco de acreción. Si pudiéramos seguir la trayectoria de una partícula de gas en el disco de acreción, veríamos que gira alrededor del hoyo negro y se acerca lentamente a este describiendo una espiral. Si la partícula estuviera aislada giraría indefinidamente alrededor del hoyo negro, tal como un planeta gira alrededor del sol pero, al chocar con las otras partículas del gas perdería parte de su energía de movimiento y se acercaría gradualmente al hoyo negro. La situación es similar a la de un satélite artificial en órbita alrededor de la tierra: Si el satélite se encuentra fuera de la órbita terrestre, giraría indefinidamente; pero si su órbita se encuentra dentro de la atmósfera perdería su energía por la fricción por el aire, se calentaría al rojo vivo y finalmente caería al suelo. Lo mismo sucede con el gas en el disco de acreción: En este caso, la fricción de las diversas partes del gas entre sí lo calentaría enormemente, a costa de frenar su caída al hoyo negro.

Como consecuencia de la fricción, el gas del disco de acreción se calienta cada vez más a medida que se acerca al hoyo negro. Los astrofísicos han calculado que la temperatura en la parte central de un disco de acreción -más cercana al hoyo negro- puede alcanzar varios millones de grados.

Como todos sabemos la materia caliente emite luz. La luz es una onda electromagnética cuya longitud de onda determina el color. Nuestros ojos solo pueden percibir la luz con longitudes de onda entre 4 y 8 cienmilésimas de centímetro, que corresponde al violeta y al rojo, respectivamente: los dos extremos del arco iris. Pero, más allá del violeta, están la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma con longitudes de ondas cortas (y energías mayores); en el otro extremo, más allá del rojo, están la luz infrarroja, la microondas y las ondas de radio, con longitudes cada vez mayores (y energías menores). La materia calentada a algunos miles de grados (la superficie del Sol) emite la mayor parte de luz en el rango de luz visible. En cambio,

la materia caliente a varios millones de grados emite luz principalmente en forma de rayos X. Así, el gas de un disco de acreción llega a calentarse tanto, poco antes de caer al hoyo negro, que emite rayos X. visto desde la Tierra, un sistema doble como el descrito tendría la apariencia de una estrella normal que gira al rededor de una compañera visible y, además, la posición de ese sistema coincidiría con una fuente cósmica de rayos x.

Hay que precisar que la formación de un disco de acreción no es exclusiva de un hoyo negro. Si la compañera normal es una estrella de neutrones, cuyo tamaño y atracción gravitacional son comparables con las de un hoyo negro, también se puede formar un disco de acreción con características muy semejantes al que se originan alrededor de un hoyo negro. La emisión intensa de rayos X en un sistema binario no necesariamente detecta la presencia de un hoyo negro. Si se trata de una estrella de neutrones, es muy probable que esta emita los pulsos de radio tan característicos de estos objetos; pero aun si no se detectan tales pulsos, no se puede descartar la presencia de una estrella de neutrones, porque no todas emiten pulsos que se puedan recibir en la tierra. El parámetro drástico que permite discernir entre un hoyo negro y la estrella de neutrones es la masa que debe determinarse de alguna forma indirecta.

A diferencia de la luz visible de las estrellas, los rayos X de origen cósmico no pueden llegar a la superficie de la Tierra porque son absorbidos por la atmósfera terrestre. La única manera de detectarlos es por medio de telescopios espaciales colocados en los satélites artificiales que giran por encima de la atmósfera terrestre. En 1970 se puso en órbita un satélite llamado UHURU, diseñado especialmente para observar el cielo a la luz de los rayos X. La imagen del universo que se reveló resultó ser muy distinta que la que estamos acostumbrados a ver. Por lo que se refiere al tema que nos interesa, el satélite localizó varias fuentes de rayos x en el cielo cada una de las cuales coincidía en posición, justamente con una estrella "normal".

Evidentemente si se logra determinar la masa del objeto que se encuentra en el centro del disco de acreción, ésta resulta ser varias veces la del Sol, entonces no habrá duda de que se trata de un hoyo negro. Sin embargo, medir la masa de una estrella, o de cualquier objeto cósmico es imposible en la práctica, a menos de que se pueda observar cómo influye gravitacionalmente sobre algún cuerpo vacío cercano cuya masa sí sea conocida. Los astrónomos han logrado determinar la masa de algunas estrellas que se encuentran en sistemas binarios, estudiando sus movimientos; por otra parte, han podido clasificar a las estrellas según sus características directamente observadas, lo que ha permitido establecer una relación bastante precisa entre el tipo estelar y la masa de cualquier estrella. Conociendo la masa de la estrella normal visible en un sistema binario que emite rayos X, los astrónomos pueden determinar, en forma más o menos aproximada, la masa de

la compañera invisible. En algunos casos, esta masa resultó ser demasiado grande para una estrella de neutrones.

En el caso más conocido y mejor estudiado es el del sistema Cygnus X-1, así llamado porque es la primera fuente de rayos X que se descubrió en la constelación del Cisne. Esta fuente corresponde, en luz visible, a una aparentemente insignificante estrella, sólo visible con el telescopio, que lleva el número 1665 en el catálogo Henry raper(HD) de estrellas. HD 1665 es un sistema binario formado por una estrella gigante muy caliente, que da una vuelta en 5 días y medio alrededor de otro cuerpo masivo invisible.se han hecho varias estimaciones de la masa de ese de ese compañero invisible y todos los cálculos indican superiores a 7 veces la masa del Sol. Hoy en día, la mayoría de los astrónomos están convencidos de que Cygnus X-1 (HD 1665)es un sistema binario formado por una estrella gigante y un hoyo negro, alrededor del cual se ha formado un disco de acreción.

Hasta ahora, se conocen tres casos de fuentes de rayos X que, según las evidencias, podrían corresponder a sistemas binarios con hoyos negroS. Cygnus X-1 sigue siendo el más notorio y el mejor estudiado por su relativa cercanía (sólo diez mil años luz). Otro sistema binario , muy parecido a Cygnus X-1, pero considerablemente más alejado, es LMC X-3, en la Nube mayor de Magallanes. Más reciente, en 1986, se descubrió que un sistema binario, con el nombre poco sugestivo de A0620-00 y a sólo 3000 años luz de distancia, emitía rayos X; una de las componentes no se observaba y la otra era una estrella más pequeña que el sol. Apartir del período de revolución de la estrella visible, se calculò que la masa de la componente invisible es de unas 3 veces la masa solar, lo cual hace sospechar muy frecuentemente que se trata de un hoyo negro.

Referencias

- [1] S.W. Hawkin & G. F. R. Ellis. The large scale structure of space-time. Cambridge University Press 1973.

- [2] E. Papantonopoulos (Ed.), The Physics of the Early Universe, Lect. Notes Phys. 653 (Springer, Berlin Heidelberg 2005), DOI 10.1007/b99562

- [3] Hacyan Shahen, Los hoyos negro y la curvatura del espacio-tiempo. Colección La ciencia para todos FCE 2000).

- [4] Hawking (TV) dirigida por Phillip Martin. BBC Corporation 2004