

El límite de la luz, inicio de un hoyo negro

CIN2017A20269

Centro Universitario México

Almaraz Zamora Aishlin Astrid

Figarola Escarela Juan

Mata Mateos Sebastián

Físico-Matemático y de las Ingenierías

Asesor: Jesús Flores Téllez

Ponencia

Índice

| | |
|--|----|
| Introducción | 5 |
| Marco | |
| Teórico..... | 5 |
| Teoría Especial de la Relatividad..... | 6 |
| Electromagnetismo | |
| | 10 |
| Teoría General de la Relatividad..... | |
| 11 | |
| Metodología | 13 |
| Resultados | |
| | 14 |

| | |
|---------------------------------|----|
| Propiedades de los hoyos negros | 16 |
| Conclusiones | 18 |
| Aparato Crítico | 19 |

Resumen:

Este proyecto consta de una práctica teórica cuyo objetivo es el estudio de las singularidades llamadas hoyos negros por lo tanto para su correcto y preciso resultado se requiere de una extensa investigación.

Nosotros, al igual que el ser humano a lo largo de su existencia, nos hemos cuestionado sobre la procedencia y razón de la existencia misma. Al tiempo que buscamos estas respuestas nos encontramos con más preguntas que se encuentran en la naturaleza misma, lo que nos hace cuestionarnos sobre su origen y funcionamiento, porque la ciencia busca eso el origen y funcionamiento de un sistema. En nuestro caso el sistema que queremos estudiar es un hoyo negro. Sé que se nos hace interesante como a partir de un cuerpo que tuvo una masa estable se origine una singularidad debido al colapso gravitacional de su masa.

Nuestra investigación abarcara diversos temas, todos relacionados con la explicación de estos entes tan llamativos que son los hoyos negros, ya que tienen una estructura no tan fácil de entender, puesto que rompen con nuestro sentido común del pensamiento y llevan al límite las leyes físicas que hasta ahora el humano ha desarrollado para entender el entorno que lo rodea. Esta investigación propone empezar desde la relatividad, ya que esta teoría fue la que rompió con el sentido común que se tenía en el siglo XX, puesto que previamente se creía que todo podía cobrar sentido con las leyes del movimiento de Newton, para que esta teoría se estructurará bien tuvieron que pasar varios años de investigaciones extensas que llegarían a la conclusión de que los sistemas de referencia hacían ver diferente las cosas, por lo que un evento que un observador hallase como verdadero y preciso pudiera ser falso para otro por una relación que existiría en el sistema de referencia. La relatividad especial fue la primera que surgió y tuvo un gran auge sobre todo en el tema de electromagnetismo y cuestiones de dilatación del tiempo, por lo que será igual de

importante agregarla a la información que se investigue a fondo. Después de la Relatividad especial se tendría que hablar de la relatividad que es la una teoría que al igual que la teoría de relatividad especial habla sobre los sistemas relativos al observador pero agrega a sus dogmas a la gravedad puesto que la relatividad especial no hablaba de la gravedad y esta toma un gran papel en la relatividad y en la existencia misma puesto que al proponer que nosotros y las cosas materiales somos ubicados en cuatro dimensiones tendría se propone como consecuencia de estas cuatro dimensiones a la gravedad, que altera y en dados casos distorsiona a la realidad. También trataremos el tema del espacio-tiempo y la curvatura del espacio debido a los hoyos negro, de ahí la importancia de incluir a la relatividad especial y general.

También en nuestra investigación hablaremos sobre la vida de las estrellas, sin embargo nosotros nos enfocaremos y analizaremos a detalle la muerte de las estrellas. Puesto que los hoyos negros generalmente se originan de la muerte de una estrella cuya masa rebasa el límite de estabilidad que hay para que no existiese un colapso gravitatorio que origine una singularidad, a esta singularidad le llamamos un hoyo negro.

Durante esta recopilación de información también nos encontramos con datos que ciertamente no teníamos sobre un hoyo negro, como lo es la termodinámica que existe afuera de los hoyos negros, porque como hemos visto nadie sabe qué pasa adentro de un agujero negro, sin embargo alrededor de un agujero negro ocurren cosas impresionantes como lo es la termodinámica de un hoyo negro, las leyes de la termodinámica se cumplen afuera de un hoyo negro, la ley de entropía cobra un gran sentido e importancia en esta parte de la termodinámica. Otra cosa que nos impactó en esta búsqueda fue la aceleración de las partículas que se encuentran alrededor del hoyo negro, al igual que el choque que ocurre entre las partículas y sus perspectivas antipartículas que hacen de esta singularidad una explosión constante de partículas donde liberan energía en forma de calor (por lo que la temperatura a una distancia relativamente cercana de un hoyo negro es muy elevada), además liberan ondas de luz como lo son los rayos gamma y los rayos x.

Después de efectuar la investigación hemos realizado una pequeña maqueta que

represente la curvatura del espacio tiempo y la deformación que tiene la luz al pasar por ella.

Nuestra conclusión es que un hoyo negro es uno ente muy complejo, pero que a pesar de su complejidad es extremadamente interesante.

Resumen:

Planteamiento; El ser humano tiene la necesidad del conocimiento, y un evento que particularmente le intriga es la naturaleza de un hoyo negro, puesto que este rompe con la lógica humana.

Propósitos; Hacer una investigación documental sobre el origen, propiedades y naturaleza de un hoyo negro.

Metodología; Primero analizaremos la vida de las estrellas. Una estrella es una gigantesca masa de gas incandescente. Luego estudiaremos directamente a los hoyos negros desde su origen hasta sus características al igual que como el horizonte de sucesos y el anillo de acreción.

Resultados; El origen de los hoyos negros se encuentra principalmente en la muerte de estrellas, debido a que llega a un punto donde su masa es tal que se comprime debido a la atracción gravitacional. El área del horizonte de sucesos puede aumentar pero nunca disminuye. La energía del hoyo negro siempre aumenta, al igual que su entropía. Se obtuvo una maqueta con una malla metálica y una estructura de madera representando la deformación de la luz.

Conclusiones; El conocimiento que tenemos sobre los hoyos negros ha sido ampliado desde sus primeras menciones como los cuerpos oscuros de Laplace. Acreción es el proceso mediante el cual una estrella atrae gravitacionalmente el gas de sus alrededores. En este proceso las partículas comienzan a girar a lo largo del espacio curvado por el hoyo negro generando, por su movimiento, un disco. Aunque el hombre ha descubierto más sobre la naturaleza de esto, aún quedan las interrogantes de lo que sucede en el interior.

Proposal; the human being has the need for knowledge and one event that particularly intrigue him is the nature of a black hole, because this event breaks the human logic.

Purposes; Make a documental investigation about the origins, properties and the nature of a black hole.

Methodology; First we'll analyze the life of the stars, a star is gigantic mass of incandescent gas. Then we will study directly a black hole since their beginnings up to their characteristics as same as the event horizon and the accretion ring of a black hole.

Results; you can mainly find the origin of a black hole in the death of a star, the star reaches a point where the mass is so big that it compress itself because of the gravitational attraction. The area of the event horizon can increase but it never decrease. The energy of the black hole is always increasing such as the entropy. We made a model with a metal net and a wood structure that represents deformation of light passing through a black hole.

Conclusions: The knowledge we have about black holes has been increasing since one of the first mentions made by Pierre-Simon Laplace. Accretion is the process through which a star attracts that is besides. In this process, particles start to spin around the black hole. As a result, we have an accretion disk. Even though we have discovered more about black holes' nature, we still have questions to answer.

Introducción

Planteamiento del problema

El ser humano ha tenido dos preguntas fundamentales desde que fue consciente de su realidad en éste cosmos: ¿De dónde venimos? ¿Hacia dónde vamos? Desde las antiguas civilizaciones se ha buscado las respuestas a estas preguntas, en la comprensión del comportamiento de los cielos, hoy en día la Astronomía continúa esta búsqueda en el estudio de las estrellas y los objetos celestes que ha descubierto. Actualmente uno de los eventos de la naturaleza, que dan luz en la comprensión del origen del universo, es el surgimiento de un hoyo negro, que pone en jaque a la razón humana y a las leyes de la Física.

Nuestro proyecto pretende hacer una investigación documental sobre la naturaleza de los Hoyos Negros y la relación que pueden tener con una mayor comprensión del origen del Universo, a partir de la Teoría del Big-Bang o de la Gran Explosión.

Marco Teórico

El objetivo final de la ciencia es el proporcionar una única Teoría que describa correctamente todo el universo.

Los científicos actuales describen el universo a través de dos teorías parciales fundamentales: la teoría de la relatividad general y la mecánica cuántica. Ellas constituyen el gran logro intelectual de la primera mitad de este siglo. La teoría de la relatividad general describe la fuerza de la gravedad y la estructura a gran escala del universo, es decir, la estructura a escalas que van desde sólo unos pocos kilómetros hasta un billón de billones (un 1 con veinticuatro ceros detrás) de kilómetros, el tamaño del universo observable. La mecánica cuántica, por el contrario, se ocupa de los fenómenos a escalas extremadamente pequeñas, tales como una billonésima de centímetro. Desafortunadamente, sin embargo, se sabe que estas dos teorías son inconsistentes entre sí: ambas no pueden ser correctas a la vez. Uno de los mayores esfuerzos de la física actual, es la búsqueda de una nueva teoría que incorpore a las dos anteriores: una teoría cuántica de la gravedad. Aún no se dispone de tal teoría, y para ello todavía puede quedar un largo camino por recorrer, pero sí se conocen muchas de las propiedades que debe poseer. En capítulos posteriores veremos que ya se sabe relativamente bastante acerca de las predicciones que debe hacer una teoría cuántica de la gravedad.

Relatividad Especial

(Teoría de Einstein basada en la idea de que las leyes de la ciencia deben ser las mismas para todos los observadores que se mueven libremente con velocidad constante, no importando la magnitud su velocidad.)

Durante el siglo XVII los científicos creyeron que la gravedad estaba gobernada por las leyes de Newton y que la luz estaba constituida por corpúsculos que eran emitidos a una velocidad muy alta.

En 1873 el filósofo naturalista británico John Michell combinó la descripción corpuscular de la luz con las leyes de la gravitación de Newton y en base a un experimento que hizo

pudo llegar a lo siguiente: la mínima velocidad inicial necesaria para que la partícula pueda escapar, se denomina “velocidad de escape”.

Calcular la velocidad de escape utilizando las leyes de la gravedad de Newton pudo demostrar que es proporcional a la raíz cuadrada de la masa de la estrella dividida por su circunferencia. Cuanto más pequeña es la circunferencia mayor es la gravedad en la superficie y más trabajo tiene que hacer la partícula para escapar de la atracción gravitatoria de la estrella.

También existe una circunferencia crítica, para la que la velocidad de escape es igual a la velocidad de la luz.

Miichell fue llevado a especular que el Universo podría contener un número enorme de tales estrellas oscuras. Estas “estrellas oscuras” eran las versiones de los agujeros negros del siglo XVII.

Sin embargo, el descubrimiento de la interferencia de la luz consigo misma repercutió en la investigación del filósofo naturalista Pierre Simon Laplace quien popularizó la predicción de Michell.

Más de un siglo después con la formulación de Einstein sobre la gravedad en la relatividad los físicos pudieron confiar en el concepto que se tenía y retomaron las estrellas oscuras de Michell y Laplace.

Durante más de dos siglos, la mecánica de Newton dominó completamente en la física: el universo entero parecía comportarse tal como lo predecían las ecuaciones de la física newtoniana y la comprensión de la naturaleza se había reducido a un problema de técnica matemática. Pero a principios del siglo XX empezaron a surgir evidencias de que la física clásica, así como todos los conceptos relacionados con ella, no describe adecuadamente a los fenómenos que suceden a la escala de los átomos o a velocidades comparables a la de la luz. Para estudiar o describir un fenómeno físico debemos recurrir necesariamente a un sistema de referencia con respecto al cual efectuamos mediciones. Así, todo movimiento es relativo al sistema de referencia en el cual se observa y, las leyes de la física, no cambian de un sistema a otro. Este hecho fundamental se conoce como principio de relatividad de Galileo.

Para cada suceso en el espacio-tiempo se puede construir un cono de luz (el conjunto de todos los posibles caminos luminosos en el espacio-tiempo emitidos en ese suceso) y dado que la velocidad de la luz es la misma para cada suceso y en cada dirección, todos los conos de luz serán idénticos y estarán orientados en la misma dirección.

La teoría también nos dice que nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz. Esto significa que el camino de cualquier objeto a través del espacio y del tiempo debe estar representado por una línea que cae dentro del cono de luz de cualquier suceso en ella.

Las leyes de Newton del movimiento acabaron con la idea de una posición absoluta en el espacio. La teoría de la relatividad elimina el concepto de un tiempo absoluto. En la teoría de la relatividad no existe un tiempo absoluto único, sino que cada individuo posee su propia medida personal del tiempo, medida que depende de dónde está y de cómo se mueve.

La teoría de la relatividad especial tuvo éxito al explicar por qué la velocidad de la luz era la misma para todos los observadores (tal y como había mostrado el experimento de Michelson-Morley) y al describir adecuadamente lo que sucede cuando los objetos se mueven con velocidades cercanas a la de la luz. Sin embargo, la teoría era inconsistente con la teoría de la gravitación de Newton, que decía que los objetos se atraían mutuamente con una fuerza dependiente de la distancia entre ellos. Esto significaba que, si uno movía uno de los objetos, la fuerza sobre el otro cambiaría instantáneamente. o, en otras palabras, los efectos gravitatorios deberían viajar con velocidad infinita, en vez de con una velocidad igual o menor que la de la luz, como la teoría de la relatividad especial requería. Einstein realizó entre 1908 y 1914 varios intentos, sin éxito, para encontrar una teoría de la gravedad que fuera consistente con la relatividad especial. Finalmente, en 1915, propuso lo que hoy en día se conoce como teoría de la relatividad general.

Antes de 1915, se pensaba en el espacio y en el tiempo como si se tratara de un marco fijo en el que los acontecimientos tenían lugar, pero que no estaba afectado por lo que en él sucediera. Esto era cierto incluso en la teoría de la relatividad

especial. Los cuerpos se movían, las fuerzas atraían y repelían, pero el tiempo y el espacio simplemente continuaban, sin ser afectados por nada. Era natural pensar que el espacio y el tiempo habían existido desde siempre.

Sin embargo, los filósofos y los físicos clásicos veían con desagrado hecho de que no existiera un sistema de referencia absoluto con respecto al cual definir todos los movimientos del Universo. Estrictamente hablando, el principio de relatividad no excluye la existencia de tal sistema absoluto, únicamente postula que las leyes de la física son las mismas en ese y en cualquier otro sistema. Pero, a mediados del siglo XIX, surgieron las primeras dificultades de la relatividad galileana, cuando el físico escocés James Clerk Maxwell formuló la teoría matemática de los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Los efectos predichos por la teoría de la relatividad son imperceptibles en nuestra vida cotidiana y sólo se manifiestan cuando se involucran velocidades comparables a la de la luz.

La contracción del tiempo no es el único efecto sorprendente que predice la teoría de la relatividad. Einstein también demostró que existe una equivalencia entre la energía y la masa, dada por la famosa fórmula:

$$E = mc^2$$

Donde E es la energía equivalente a una masa m de materia.

De la fórmula $E = mc^2$ no se deduce que cualquier masa se puede transformar en energía o viceversa; este proceso se da sólo en condiciones muy particulares. Hemos mencionado la fusión nuclear, pero la manera más eficiente de transformar masa en energía es por la aniquilación de la materia con la antimateria

Para aumentar la velocidad de un cuerpo, hay que proporcionarle energía, lo cual se manifiesta como un aumento de la masa del cuerpo. La teoría de la relatividad predice que la energía necesaria para que un cuerpo de masa m alcance la velocidad v es:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

En el límite $v = 0$, se recupera la fórmula $E = mc^2$ para la energía ya existente en forma de masa. En el otro extremo, la energía E aumenta con la velocidad y se necesita una energía infinita para que el cuerpo alcance la velocidad de la luz. Es por ello que, según la teoría de la relatividad, ningún cuerpo puede alcanzar o superar la velocidad de la luz. La excepción es la luz misma: según la física moderna la luz está constituida por unas partículas llamadas fotones, la masa de un fotón es nula y, por ello, puede viajar a la velocidad límite c .

Electromagnetismo

Maxwell demostró que la electricidad y el magnetismo son dos aspectos de un mismo fenómeno: el electromagnetismo. Como una de las consecuencias más importantes de su teoría descubrió que la luz es una vibración electromagnética que se propaga exactamente como una onda. Pero las ondas lo hacen en medios materiales, por lo que los físicos del siglo pasado postularon la existencia de un medio extremadamente sutil, el éter, que llenaba al Universo entero, permeaba todos los cuerpos y servía de sustento a la luz. Según esta concepción, la luz sería una vibración del éter del mismo modo que el sonido es una vibración del aire.

De existir el éter, sería un sistema de referencia absoluto con respecto al cual medir el movimiento de todos los cuerpos en el Universo. Más aún, se descubrió que las ecuaciones de Maxwell cambian de forma al pasar de un sistema de referencia a otro, lo cual implicaría que el principio de relatividad no se aplica a los fenómenos electromagnéticos. Se postuló, entonces, que estas ecuaciones sólo son válidas en el sistema de referencia del éter en reposo. Esto no es sorprendente pues la luz, fenómeno electromagnético, se propaga con una velocidad bien definida en el éter y esta velocidad debe ser distinta en un sistema de referencia en movimiento con respecto al éter. Al parecer, la teoría electromagnética de Maxwell restituía un sistema de referencia absoluto.

Einstein postuló que las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo son rigurosamente válidas en cualquier sistema de referencia. Esta condición de invariancia

se cumple a condición de que el tiempo medido en un sistema no coincida con el medido en otro sistema. Este hecho no había sido tomado en cuenta por los antecesores de Einstein y, por esta razón, las ecuaciones de Maxwell parecían violar el principio de relatividad.

Habiendo postulado que no puede haber ningún sistema de referencia privilegiado, Einstein concluyó que el éter simplemente no existe. Pero, entonces ¿con respecto a qué debe medirse la velocidad de la luz? La respuesta de Einstein fue drástica: la velocidad de la luz es la misma en cualquier sistema de referencia. Después de todo, eso es lo que indica el experimento de Michelson y Morley.

Relatividad General

En la relatividad general, el espacio y el tiempo son cantidades dinámicas: cuando un cuerpo se mueve, o una fuerza actúa, afecta a la curvatura del espacio y del tiempo, y, en contrapartida, la estructura del espacio-tiempo afecta al modo en que los cuerpos se mueven y las fuerzas actúan. El espacio y el tiempo no sólo afectan, sino que también son afectados por todo aquello que sucede en el universo. De la misma manera que no se puede hablar acerca de los fenómenos del universo sin las nociones de espacio y tiempo, en relatividad general no tiene sentido hablar del espacio y del tiempo fuera de los límites del universo.

En las décadas siguientes al descubrimiento de la relatividad general, estos nuevos conceptos de espacio y tiempo iban a revolucionar nuestra imagen del universo. La vieja idea de un universo esencialmente inalterable que podría haber existido, y que podría continuar existiendo por siempre, fue reemplazada por el concepto de un universo dinámico, en expansión, que parecía haber comenzado hace cierto tiempo finito, y que podría acabar en un tiempo finito en el futuro. Esa revolución es el objeto del siguiente capítulo. Y años después de haber tenido lugar, sería también el punto de arranque de mi trabajo en física teórica. Roger Penrose y yo mostramos cómo la teoría de la relatividad general de Einstein implicaba que el universo debía tener un principio y, posiblemente, un final.

La relatividad especial surgió de una comprensión global de las fuerzas electromagnéticas. Sin embargo, existe en la naturaleza otro tipo de fuerza, la gravitación, cuya descripción no cabe dentro de la teoría de la relatividad especial. Como vimos anteriormente, la mecánica clásica es el fundamento de la teoría newtoniana de la gravitación, pero, en casos extremos, esta mecánica es incompatible con la relatividad especial. Era necesario, pues, crear una teoría relativista de la gravitación, que incluyera, por una parte, la teoría newtoniana en el límite de velocidades pequeñas y, por otra, a la relatividad especial en el caso especial en que la fuerza gravitacional tenga efectos despreciables. Éste es el formidable problema que atacó Einstein desde 1905, cuando presentó su teoría especial, hasta 1915, cuando publicó la versión definitiva de la teoría de la relatividad general.

Para incluir a la gravedad en una teoría relativista, Einstein desafió una vez más al sentido común al postular que el espacio-tiempo es curvo y la gravedad es la manifestación de esa curvatura.

Riemann demostró que las propiedades básicas de un espacio curvo están determinadas exclusivamente por la fórmula para medir "distancias". Cada forma de ds^2 define un cierto espacio riemanniano, en el que las líneas rectas pierden sentido, pero son sustituidas por curvas geodésicas cuya longitud —medida según ds^2 — es mínima. A diferencia de las superficies, que son espacios de dos dimensiones, los espacios curvos de tres o más dimensiones simplemente no se pueden visualizar. Sin embargo, es posible definirlos y manejarlos matemáticamente sin ninguna dificultad formal; los espacios riemannianos son un excelente ejemplo de un concepto que sólo se puede describir en el lenguaje matemático.

La esencia de la teoría de la relatividad general es que el espacio-tiempo es curvo. En ausencia de masas gravitantes se tiene un espacio-tiempo de Minkowski y una partícula se mueve en línea recta porque nada influye sobre su trayectoria. La presencia de una masa deforma al espacio-tiempo y el concepto de recta pierde su sentido; en un espacio-tiempo curvo, una partícula se mueve a lo largo de una geodésica. Según esta interpretación, un planeta gira alrededor del Sol porque sigue una trayectoria geodésica en el espacio-tiempo deformado por la masa solar.

En un espacio-tiempo de Minkowski, la pseudodistancia o tiempo propio se mide según la fórmula $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$ pero en un espacio-tiempo riemanniano, la fórmula para ds^2 toma una forma más general determinada por la distribución de masa. En la teoría newtoniana, se puede calcular matemáticamente la atracción gravitacional ejercida por una distribución dada de masa. En la teoría de Einstein, la situación es bastante más complicada porque no sólo la masa sino también la energía ejerce una acción gravitacional. En su artículo de 1915, Einstein dedujo la fórmula matemática que relaciona la geometría del espacio-tiempo con la distribución de masa y energía: esta fórmula se conoce como ecuación de Einstein y es el corazón de la teoría de la relatividad general

El segundo efecto importante que predijo Einstein es que la trayectoria de la luz, al igual que la de un proyectil, debe desviarse por la atracción gravitacional de un cuerpo masivo. Al contrario de la teoría de Newton, la relatividad general sí predice cómo se mueve la luz bajo la acción de la gravedad. Einstein calculó que un rayo luminoso debe desviarse un ángulo de 1.75 segundos de arco al pasar cerca del Sol (Figura 13), lo cual podría comprobarse determinando la posición aparente de una estrella cercana al disco solar durante un eclipse. Esta observación fue realizada por el astrofísico inglés A. S. Eddington al término de la primera Guerra Mundial, confirmando la predicción de Einstein.

Evidentemente, el espacio-tiempo resultante

debe tener propiedades simétricas alrededor de la masa considerada; esto simplifica notablemente las ecuaciones, a tal grado que encontró una solución exacta: el espacio-tiempo de Schwarzschild, un espacio riemanniano que describe la región externa de un cuerpo esférico con masa M y radio arbitrario.

Las partículas se mueven en este espacio-tiempo a lo largo de geodésicas, lo cual se reduce, en primera aproximación, justamente a las trayectorias predichas por la mecánica de Newton.

El resultado obtenido por Schwarzschild fue publicado en julio de 1916, dos meses después de la muerte de su autor. Durante varias décadas, fue prácticamente el único

ejemplo, junto con los modelos cosmológicos,⁵ de una solución de la ecuación de Einstein que corresponde a una situación física real.

Metodología

Muerte de una estrella. Inicio de un agujero negro

Primero daremos una breve definición de lo que es una estrella. Una estrella es una gigantesca masa de gas incandescente. Esta brilla debido a la fusión nuclear que se produce en su centro y que a su vez alcanza altas temperaturas. A tales temperaturas, los núcleos chocan a altas velocidades unos contra otros que terminan por fusionarse. Al principio son los núcleos de hidrógeno los que reaccionan para producir núcleos de helio.

Cuando el combustible nuclear de una estrella se agota, todo el hidrógeno del centro de la estrella se ha transformado en helio y pueden ocurrir otras reacciones nucleares en las que estén involucrados otros elementos químicos. Así, si la temperatura en el centro de la estrella alcanza unos doscientos millones de grados, los núcleos de helio se fusionan entre sí y producen núcleos de oxígeno y carbono.

A partir de este momento, la estrella pasa de un estado de compresión a expansión y viceversa. En el proceso arroja parte importante de su masa que a su vez se combina con gas interestelar y esto forma nuevas estrellas. En función a la masa de la estrella esta puede convertirse en enana blanca, estrella de neutrones y hoyo negro. Para efectos prácticos, estudiaremos directamente a los hoyos negros.

Cuando se tiene una estrella muy masiva esta sufrirá de una compresión por una fuerte atracción gravitacional. Los neutrones siguiendo el principio de exclusión, se fusionarán entre sí para transformarse en otros tipos de partículas elementales, o, finalmente, romperse en sus constituyentes más básicos.

Resultados

Agujeros Negros y termodinámica

En 1970 se realizó un descubrimiento matemático: la superficie de horizonte de sucesos tiende a aumentar siempre que materia o radiación cae en el agujero negro. Arrojando indicios de una posible relación entre agujeros negros y la termodinámica.

Además, si dos agujeros negros chocan y se funden en uno solo, el área del horizonte de sucesos alrededor del agujero negro resultante es superior a la suma de las áreas de los horizontes de sucesos de los agujeros negros originales.

Estas propiedades indican que existe una semejanza entre el área de un horizonte de sucesos de un agujero negro y el concepto de entropía en termodinámica.

La primera ley de la termodinámica señala que un pequeño cambio en la entropía de un sistema se halla acompañado de un cambio proporcional en la energía del sistema. Al hecho de la proporcionalidad se denomina temperatura del sistema.

Una vez formado un hoyo negro, todavía puede alterar su estado si absorbe materia que le cae desde lejos. Si esto sucede, entonces, después de un breve periodo de reajuste, el hoyo negro regresa a un estado estacionario en el que sus tres parámetros fundamentales adquieren nuevos valores, de acuerdo con las características de la materia que absorbió.

James M. Bardeen, Brandon Carter y Stephen Hawking hallaron una ley que relaciona el cambio de masa de un agujero negro con el cambio en el área del horizonte de sucesos. El factor de proporcionalidad implica una cantidad a la que se denomina superficie de la gravedad, que es una medida de la fuerza del campo gravitacional en el horizonte de sucesos. Si se admite que el área del horizonte de sucesos es análoga a la entropía, entonces parece que la gravedad superficial tiene que ser igual en todos los puntos del horizonte de sucesos, del mismo modo que es igual la temperatura en todos los puntos de un cuerpo con equilibrio térmico.

Según el teorema de Hawking, el área del horizonte de un hoyo negro puede aumentar o permanecer constante pero en ningún caso puede disminuir

$$\frac{c^2}{G} \sqrt{\frac{A}{16\pi}}$$

donde A es el área inicial del hoyo.

Se puede demostrar que existe una relación precisa entre los incrementos de la masa y del área de un hoyo negro. Si el área de un hoyo negro aumenta en una cantidad ΔA , entonces la masa se incrementa en una cantidad ΔM , dada por la fórmula

$$\Delta M = \frac{k}{8\pi G} \Delta A + (\text{términos adicionales}),$$

donde la cantidad K es la gravedad superficial del hoyo negro.

La primera ley de la termodinámica permite relacionar el aumento de la energía interna (por ejemplo, energía en forma de calor) con el aumento de la entropía. Si ΔS es el incremento de la entropía de un cuerpo, entonces su energía interna incrementa.

$$\Delta E = T\Delta S + (\text{términos adicionales})$$

La entropía de un sistema aislado siempre aumenta con el tiempo, o al menos permanece constante, el tiempo corre en la dirección en que aumenta la entropía. (Segunda ley de termodinámica)

Propiedades de un agujero negro

Los hoyos negros no emiten luz, ni ninguna otra señal; sólo se manifiestan por medio de su atracción gravitacional. Es importante señalar que la temperatura de un hoyo negro es *inversamente* proporcional a su masa.

Jacob D. Bekenstein dice: cuando se crea un agujero negro por obra de un colapso gravitatorio, rápidamente entra en una situación estacionaria caracterizada solo por tres parámetros: la masa, el momento angular y la carga eléctrica.

La masa y el momento angular de un agujero negro determinan todas las propiedades del horizonte del agujero y su exterior sin embargo esto no determina su interior. El proceso por el que un cuerpo cósmico atrae gravitacionalmente y absorbe el gas de sus

alrededores ha sido llamado *acreción* por los astrofísicos.

Si seguimos la trayectoria de una partícula de gas en el disco de acreción, veríamos que gira alrededor del hoyo negro y se acerca lentamente a éste describiendo una espiral. Si la partícula estuviera aislada, giraría indefinidamente alrededor del hoyo negro, pero al chocar con otras partículas del gas perderá parte de su energía de movimiento y se acercará gradualmente al hoyo negro. La fricción de las diversas partes del gas entre sí lo calentarán 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 —aquella más cercana al hoyo negro— puede alcanzar varios millones de grados.

Zwicky, Oppenheimer y sus colegas, demostraron que existe un rango de masas estelares dentro del cual se espera que la estrella colapse hacia un estado en el que esté constituida por neutrones densamente empaquetados, la llamada estrella de neutrones.

A partir de la circunferencia y el periodo orbital es posible calcular la masa del agujero. El método de cálculo es el mismo que utilizó Isaac Newton en 1685 para calcular la masa del Sol: cuanto más masivo es el objeto (el Sol o el agujero), mayor es la atracción gravitatoria y, por consiguiente, más rápidamente debe moverse un cuerpo en órbita

A continuación presentaremos algunas imágenes de una maqueta que realizamos para simular un hoyo negro.

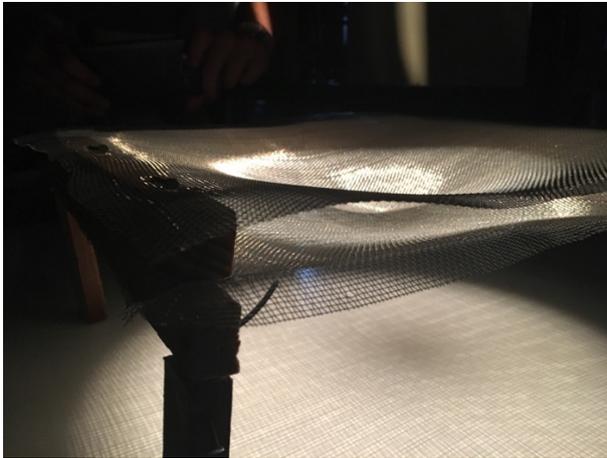


Imagen 1. Maqueta hecha a base de madera y malla metálica representando la curvatura del espacio

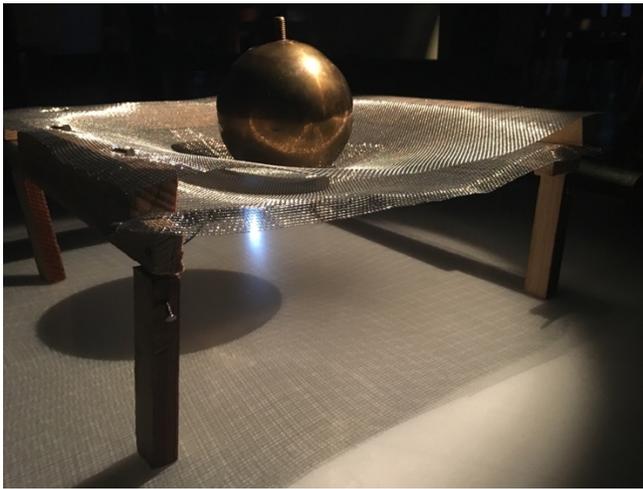


Imagen 2. Curvatura en el espacio debido a la presencia de un objeto masivo

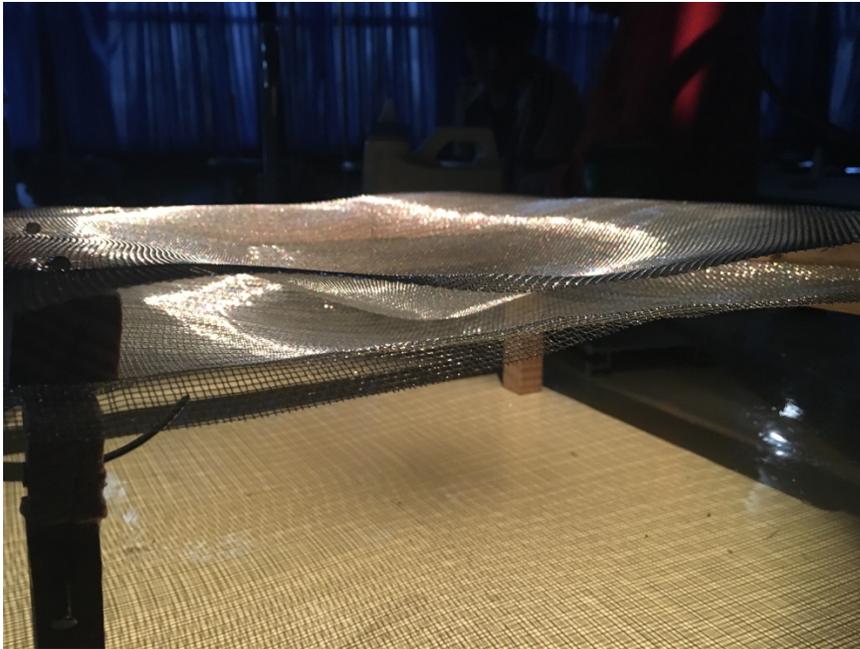


Imagen 3. Se puede observar una distorsión en las líneas reflejadas sobre el suelo

Conclusiones

Después de una extensa investigación sobre la teoría de la Relatividad General propuesta por Einstein hemos decidido profundizar en el proceso de muerte de las estrellas que resulta (en el caso de las estrellas muy masivas) en el colapso del espacio-tiempo mejor conocido como un “hoyo negro”. Es un fenómeno de la naturaleza que nos lleva a cuestionar todo lo que sabemos de la física.

Gracias a los recientes descubrimientos, como la detección de ondas gravitacionales esos “cuerpos oscuros de Laplace” que parecían un cuento de ciencia ficción se acercan más a la ciencia que a la fantasía. ¿Qué sabemos de los hoyos negros? Son una singularidad en el espacio donde la densidad es tan grande que ni siquiera la luz puede escapar. Esto, a su vez, deforma el espacio y el tiempo.

Frente a este suceso, las leyes bajo las cuales se rige el universo parecen “no funcionar”. Se necesita toda una nueva geometría para analizar el comportamiento matemático de un agujero negro, sin embargo, no parece ser el mismo caso en la termodinámica. Curiosamente la ley de entropía aplica en la primera y segunda ley. El

área del horizonte y la entropía están relacionados. Ambas son cantidades que pueden ser constantes o aumentar pero nunca disminuir.

Cuando una partícula es atraída hacia el agujero esta sigue la trayectoria de la curvatura del espacio. Se cree que comienza a girar en espiral hasta acercarse a la singularidad, donde el espacio y el tiempo es cero, sin embargo, algunos astrofísicos dicen que esta partícula simplemente es atraída hacia abajo.

Acreción es el proceso mediante el cual una estrella atrae gravitacionalmente el gas de sus alrededores. Los astrofísicos han calculado que esto podría ser una forma eficiente mediante la cual se genere energía. Aunque se necesita una gran cantidad de gas a su alrededor para que esto funcione. Como mencionamos anteriormente se han detectado ondas gravitacionales, independientemente de esto, la única forma por la cual podemos “ver” un agujero negro es por la materia que comienza a girar alrededor de este con una luz incandescente antes de ser borrado del plano dimensional que conocemos.

Aparato Crítico

Hawking, S. (2000). Historia del tiempo del big bang a los agujeros negros. Crítica

Hacyan, S. (1988). Los hoyos negros y la curvatura del espacio-tiempo. México. Fondo de Cultura Económica

Thorne, K. (1995). Agujeros negros y tiempo curvo; el escandaloso legado de Einstein. Estados Unidos. Crítica

Hawking S. (1988) Breve historia del tiempo. Crítica.

Einstein Albert, (1916) Sobre la Teoría de la Relatividad Especial y General, Alemania.