

Historia de las ondas gravitacionales

History of gravitational waves

Alejandro José Florido Tomé ⁽¹⁾

(1) Estudiante Grado Física Universidad de Córdoba

Resumen

Las ondas gravitacionales fueron predichas por Albert Einstein en 1916, quien dijo, además, que dichas ondas serían de imposible detección. Durante cien años, no habría grandes avances en este campo, solo algunas ideas e incentivos para un futuro, hasta que se puso en marcha la creación de los detectores LIGO en 1984, dando lugar, en 2015 al descubrimiento experimental de las ondas gravitacionales. Este hecho daría pie a una nueva astronomía, en la que se complementarían la observación con la información obtenida de las ondas. Con estas ondas, se pudo obtener información de uno de los cuerpos más misteriosos del universo: los agujeros negros, e incluso de las estrellas de neutrones, de colisiones de agujeros negros, de explosiones de supernovas; de cualquier cuerpo suficientemente masivo capaz de moverse o de sufrir una variación de su masa. Y hubo un año clave, 2017, en el que se descubrió un mismo fenómeno de dos maneras distintas pero complementarias, con las ondas gravitacionales y electromagnéticas, lo que comenzaría una nueva astronomía: la astronomía de multimensajeros, de la que se podría obtener más información que solamente con una de ellas. Y todo ello tuvo un objetivo: una mayor comprensión del universo, en aspectos inimaginables hasta el momento.

Palabras clave: ondas gravitacionales, Albert Einstein, LIGO, astronomía, universo.

Abstract

Gravitational waves were predicted by Albert Einstein in 1916, who also said that such waves would be impossible to detect. For a hundred years, there would be no great advances in this field, only some ideas and incentives for a future, until the creation of the LIGO detectors was launched in 1984, leading, in 2015, to the experimental discovery of gravitational waves. This would give rise to a new astronomy, in which observation would be complemented with information obtained from the waves. With these waves, it was possible to obtain information from one of the most mysterious bodies in the universe: black holes, and even from neutron stars, from collisions of black holes, from explosions of supernovae; of any sufficiently massive body capable of moving or suffering a variation of its mass. And there was a key year, 2017, in which the same phenomenon was discovered in two different but complementary ways, with gravitational and electromagnetic waves, which would start a new astronomy: multi-message astronomy, from which more information could be obtained than with just one of them. And all this had one goal: a greater understanding of the universe, in aspects unimaginable until now.

Keywords: gravitational waves, Albert Einstein, LIGO, astronomy, universe.

1. INTRODUCCIÓN (Negrita, Calibri Light 11, justificado, ordenado en número arábigos consecutivos y mayúscula sostenida)

En el presente trabajo, vamos a hablar sobre la historia de las ondas gravitacionales, desde que se predijeron, hasta que se comprobaron experimentalmente, exponiendo los hechos históricos más importantes, a parte de comentar el funcionamiento del detector de ondas gravitacionales LIGO, y entender un poco en qué consiste un agujero negro, y los tipos que hay. A continuación, veremos la mayor implicación que tuvo una onda gravitacional en la astronomía de multimensajeros, y daremos una mirada hacia el futuro que le depara a este campo.

2. DESARROLLO DEL TRABAJO (Negrita, Calibri Light 11, justificado, ordenado en número arábigos consecutivos y mayúscula sostenida)

2.1. EINSTEIN Y LA RELATIVIDAD GENERAL

Hace poco más de cien años, en 1915, un físico alemán llamado Albert Einstein (14/3/1879-18/4/1955) presentó al mundo su llamada teoría de la relatividad general, en la que describe de una manera totalmente teórica, basada en las matemáticas y en experimentos hipotéticos, que la gravedad no es en sí una fuerza como la describía Isaac Newton (25/12/1642-20/3/1727), sino una consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo debido a la presencia de materia o energía, que están íntimamente relacionadas.

Hasta ese entonces, el tiempo y el espacio eran entidades independientes, por lo que, en un principio, Einstein no tuvo mucha aceptación. Era un cambio brusco de paradigma que no se podía aceptar de un día para otro, hasta que, el 29 de mayo de 1919, Arthur Eddington (28/12/1882-22/11/1944), quien se encontraba en la isla del Príncipe (África) observó un eclipse solar, donde se apreciaba como, debido a la presencia del Sol, las estrellas cercanas a él estaban desplazadas, respaldando la teoría de Einstein.

Aunque Einstein, durante ese periodo de 4 años, no se estuvo quieto. Entre una de las cosas que hizo, destacaremos la predicción de las ondas gravitacionales.

La relatividad, si se tuviese que resumir con palabras, sería sin duda con la frase del físico teórico John Wheeler (9/7/1911-13/4/2008): “La materia le dice al espacio cómo curvarse, y el espacio a la materia cómo moverse”.

2.2. LA PREDICCIÓN DE LAS ONDAS GRAVITACIONALES

El físico, al tener su teoría lista, contempló una clara analogía entre la teoría electromagnética y la suya, y tentado por la idea de unas ondas asociadas a un campo, él busco la similitud en su teoría, y la encontró.

Teóricamente, los cuerpos suficientemente masivos y los procesos más destructivos del universo podrían emitir estas ondas gravitacionales, que son a grandes rasgos ondulaciones del espacio-tiempo que parten del foco en todas las direcciones, propagándose a la velocidad de la luz; pero esto traía consigo una gran desventaja: la imposibilidad de detectarlas.

Hablando de la gravedad como una fuerza, es la más débil de las cuatro existentes: la fuerza nuclear fuerte, la nuclear débil, la electromagnética, y la gravitatoria. Esto trae consigo que las perturbaciones que ocurren en su campo sean las más débiles, y depende de donde ocurra el suceso, la fuerza decae con la distancia al cuadrado, por lo que perderán intensidad, dificultando más su detección.

Einstein, al ver que dichas ondas serían imposibles de detectarlas, las dejó como una ilusión que nunca se cumpliría. Entidades como el ya mencionado Eddington se reían de esta idea, diciendo que “las ondas gravitacionales se propagan a la velocidad del pensamiento”. Esta idea se dejó de lado durante las próximas décadas, hasta la década de los 60.

2.3. DESARROLLO DURANTE LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO 20.

Hasta 1957 no se habló mucho, por no decir nada, de las ondas gravitacionales. En este año, hubo un congreso en Carolina del Norte, en la que el físico Felix Pirani (2/2/1928-31/12/2015), presentó cómo se podrían medir las ondas gravitacionales experimentalmente. En dicho congreso se encontraba presente Joseph Weber, quién, al año siguiente, comenzó con el diseño de un detector de ondas gravitacionales, que terminó en 1965. A fin de cuentas, consistía en un cilindro de medio metro de radio, y de una masa de 3.5 toneladas. Se dice que captó ondas gravitacionales. Seguramente no fuese así por la poca precisión, pero sí sería más que suficiente para incentivar a la comunidad científica para intentar detectar las ondas gravitacionales.

Una década después, en 1974, justo en el año en el que se le dio el Premio Nobel en Física a Anthony Hewish (11/5/1924) por el descubrimiento del primer púlsar con señales de radio, y de su desarrollo teórico, se descubrió un púlsar en un sistema binario por Joseph Taylor (29/3/1941) y por Russell Hulse (28/11/1950).

La peculiaridad de dicho sistema es que, a medida que giraban entre ellas, su órbita decrecía poco a poco, mientras su período aumentaba, disminuyendo la energía del sistema. Hulse y Taylor calcularon la energía perdida, y la cantidad de energía que debería de emitir el sistema debido a la creación de ondas gravitacionales, y dieron un resultado equivalente.

Este fue un resultado muy importante, en el que se demostró indirectamente la existencia de las ondas gravitacionales.

2.4. LIGO Y VIRGO

A finales de siglo, en 1984, Kip Thorne (1/6/1940) fue el líder del desarrollo del que sería el primer gran detector de ondas gravitacionales LIGO, que constaría con dos observatorios ubicados en Estados Unidos: uno en Livingston (Luisiana), y otro en Handford (Washington).

Estuvieron en funcionamiento entre 2001 y 2010, sin éxito en la detección de ondas gravitacionales, por lo que mejoraron el mecanismo, y estuvieron listos para febrero de 2015.

Por otro lado, Virgo es otro detector de ondas gravitacionales, un proyecto aprobado en 1993 por el instituto CNRA francés, y en 1994 por el instituto INFN italiano, que se puso en funcionamiento, y, como LIGO, tampoco detectó ondas gravitacionales, se mejoró su sensibilidad, y estuvo listo en 2016.

Vamos a explicar a grandes rasgos en qué consisten estos detectores.

LIGO Livingston cuenta con dos brazos de 4 kilómetros de largo perpendiculares entre sí, LIGO Handford con brazos de 2 kilómetros, y Virgo con brazos de 3 kilómetros, y todos ellos tienen láseres, espejos, y otros instrumentos de más sensibilidad.

Sea una fuente láser, de la que lanzamos un rayo de luz hacia un espejo, que está dispuesto de tal manera que dicha luz se divide en dos haces que siguen dos trayectorias perpendiculares, recorriendo los brazos. Al final de los brazos, hay otro espejo, en el que rebotan y vuelven al espejo del que partieron, donde colisionan. En el lugar de la colisión tendremos un fotodetector. Haremos que ambos haces de luz colisionen a la vez, es decir, que estén en fase (Ver Fig. 1).

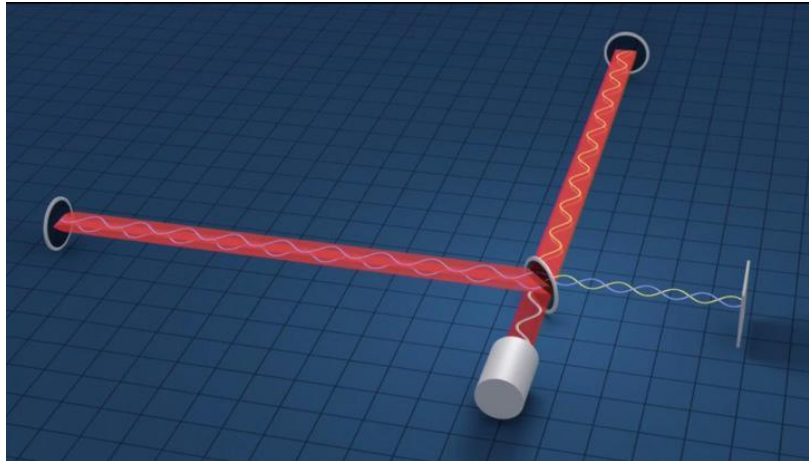


Figura 1. Esquema de un interferómetro láser

Figure 1. Schematic of a laser interferometer

Fuente: <https://www.losreplicantes.com/articulos/agujeros-negros-ondas-gravitacionales/2010>

Con el detector preparado, cuando pase una onda gravitacional por una región del espacio-tiempo, la estirará en una dirección, y la comprimirá en otra, provocando una variación en la longitud de los brazos, así que los haces de luz no colisionarán a la vez, dejando una mancha de luz en el fotodetector.

Además, para evitar posibles “falsas alarmas”, de sismos que varíen las longitudes de los brazos, o de ruido cósmico, se apoyan los datos de los tres detectores entre sí, y cuando capten una onda gravitacional, los tres tendrán los mismos datos sobre el suceso. De hecho, entre los tres, incluso se puede triangular que parte de la bóveda celeste proviene la señal.

2.5. PRIMERA DETECCIÓN

El 14 de septiembre de 2015, se detectó por primera vez una onda gravitacional directamente, cien años después de que Einstein publicará su teoría de la relatividad general.

Dicha onda atravesó la Tierra en un quinto de segundo. En primer lugar, recogió la señal LIGO Livingston, y 7 milisegundos después, la misma señal fue tomada por LIGO Handford. Sólo con esto, ya se puede saber de donde puede provenir la señal.

Lo que se ha deducido de la información extraída de las ondas gravitacionales es lo siguiente: hace unos mil trescientos millones de años (este es lo que ha tardado la onda para llegar hasta nosotros, que hace esa cantidad de tiempo, en la Tierra estaba ocurriendo la transición entre seres vivos unicelulares a pluricelulares), dos agujeros negros de 29 y 36 masas solares, que giraban entre ellas, acercándose más y más mientras giraban, y mientras más cerca, mayores eran las oscilaciones provocadas en el tejido del espacio-tiempo, emitiendo una gran cantidad de energía de esta manera, hasta que colisionaron ambos agujeros negros, y se convirtieron en uno, cediendo momentáneamente las ondas gravitacionales.

También sabemos que, en ese quinto de segundo, las velocidades relativas de los agujeros negros aumentaron enormemente, de un 30% de la velocidad de la luz, hasta alcanzar el 60% de ella, y fueron las últimas seis oscilaciones antes de la colisión, donde se alcanza un máximo de las amplitudes y de las frecuencias, hasta llegar al estallido, y a la calma.

Dicha onda gravitacional, con el paso del tiempo, cuanta más distancia recorría, más energía perdía, provocando una mínima oscilación en nuestro planeta, cuando llegan. Esta primera detección, de hecho, hizo una perturbación respecto del brazo de 4 kilómetros de LIGO de unas mil veces más

pequeña que el tamaño de un protón. Es decir, cuando la onda llegó a nosotros, tenía una amplitud de 10^{-21} metros.

2.6. CONSECUENCIAS DE ESTA PRIMERA DETECCIÓN

De aquí se dedujo que todos los cuerpos emiten ondas gravitacionales, pero solo podemos observarlas de los procesos en los que hay involucrados una gran cantidad de materia o de masa, como, por ejemplo, en la colisión de agujeros negros, o de supernovas. Son procesos que ocurren a millones de años luz de distancia, y que, cuando nos llegan, han perdido la mayoría de su energía.

A pesar de que se detectara dicha onda en septiembre de 2015, los físicos estuvieron repasando, extrayendo la mayor información posible de ella, asegurándose de que no fuese ningún error, hasta que tuvieron todo listo, y con una significancia menor que cinco sigma.

El día en el que se expuso al mundo el descubrimiento de las ondas gravitacionales fue el 11 de febrero de 2016, con Gabriela González en esos tiempos al mando del experimento LIGO, día en el que también se celebraba el día internacional de la mujer y la niña en la ciencia.

Con el experimento hecho, y las ondas gravitacionales demostradas, en 2017 se les dio el premio Nobel de Física a Rainer Weiss (29/9/1932), Kip Thorne y Barry Barish (27/1/1936).

Sin duda, el dato más curioso y fascinante que puede impactar a uno puede ser el hecho de que, estas ondas gravitacionales, tienen, de casualidad, una frecuencia parecida a la del sonido, por lo que, si se le añaden hercios, puede llegar a tener un sonido bastante espectacular. [22, Bibliografía]

2.7. LA BÓVEDA CELESTE CON ONDAS GRAVITACIONALES

Durante los próximos años, se detectarían bastantes ondas gravitacionales, de distintas frecuencias, intensidades, y procedencia, pudiendo cartografiar la bóveda celeste de una manera nunca hecha: a partir de las ondas gravitacionales (Ver Fig. 2).

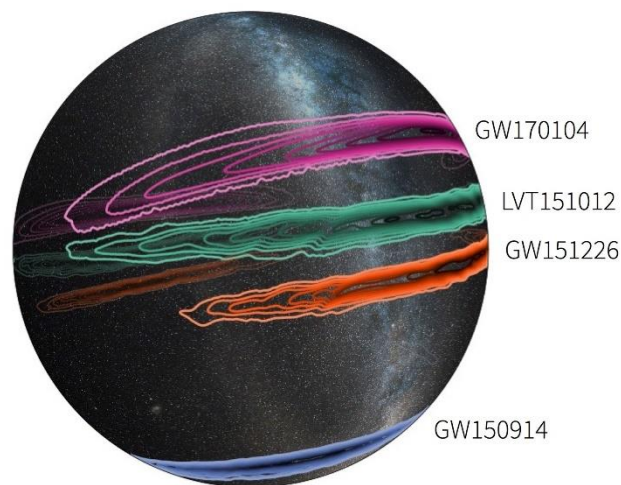


Figura 2. Dirección en la bóveda celeste de las primeras cuatro ondas gravitacionales

Figure 2. Direction in the celestial vault of the first four gravitational waves

Fuente: <https://danielmarin.naukas.com/2017/06/03/y-ligo-detecto-la-fusion-de-dos-agujeros-negros-por-tercera-vez/>

Las colisiones de agujeros negros suelen ser muy rápidas, y se fusionan a grandes velocidades y en muy poco tiempo.

De las colisiones que caben destacar en este apartado, tenemos la de dos agujeros negros que, en un segundo, giraron 27 veces entre ellas, y, además los agujeros negros giraban (esto no tiene porque ser obvio, más adelante lo comentaremos).

Otro caso es la colisión de dos agujeros negros de 50 masas solares a tres mil millones de años luz, detectada el 4 de enero de 2017, y lo curioso fue que uno de los agujeros negros no estaba alineado con el plano del sistema. Esto pudo ocurrir porque uno de los agujeros negros estaba en un sistema, en un lugar muy denso, y atrajese al otro.

De hecho, hay tantos agujeros negros en el universo observable, que se piensa que toda la materia oscura puede ser agujeros negros, aunque esto es una suposición entre muchas. Estamos hablando mucho de ellos, conque, ¿que son estos objetos estelares?

2.8. AGUJEROS NEGROS

Hablemos brevemente de estos agujeros negros.

Según las ecuaciones de Einstein, una de sus soluciones fue predicha por Karl Schwarzschild (9/10/1873-11/5/1916), en la que había un objeto astronómico que, tras un horizonte de sucesos, se presentan infinidad de probabilidades, en el aspecto en el que no se sabe que ocurre dentro. Se comenta que toda información que pasa por el horizonte de sucesos no vuelve, ni siquiera la luz; en su interior (todo esto esteóricamente) se alcanza el fin del tiempo, y será un futuro inevitable si acabas cayendo, lo que se llama una singularidad; son sin duda uno de los objetos más misteriosos del cosmos, y que tuvo a grandes pensadores de nuestro tiempo como Roger Penrose (8/8/1931) y Stephen Hawking (8/1/1942-14/3/2018) dedicándoles muchísimo esfuerzo y trabajo para tener una mayor comprensión de ellas.

Son tan difíciles por no decir casi imposible de detectar por lo comentado, que la luz no puede escapar de ella, pero sí se puede observar lo que hay alrededor, la masa que se acumula en los alrededores en lo llamada el disco de acreción.

A pesar de ello, había gente que tomaban esto como una pérdida de tiempo, hasta que, el 10 de abril de 2019 se presentó al mundo una foto real del agujero negro ubicado en el centro de la galaxia M87 (Ver Fig. 3), tomada por European Southern Observatory.

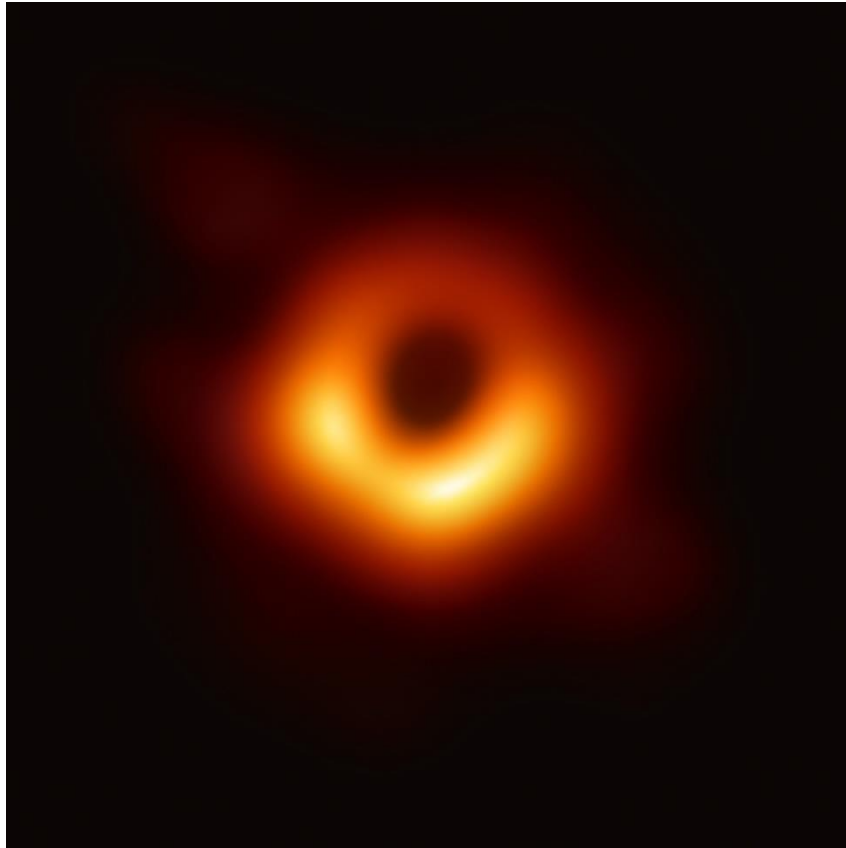


Figura 3. Primera foto de un agujero negro

Figure 3. First photo of a black hole

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Agujero_negro#/media/Archivo:Black_hole_-_Messier_87_crop_max_res.jpg

Con los agujeros negros demostrados, y sabiendo que su existencia es real, comentemos los tipos de agujeros negros que nos conciernen.

Comentemos en un primer lugar los llamados agujeros negros astrofísicos, que se crean a partir de una estrella muerta, que están girando, y al morir, y al crearse estos, también girarán, pero como tienen menos radio, y se acumula el momento angular, girará muchísimo más rápido que su predecesora.

Por otro lado, tenemos los agujeros negros primordiales, que se formarían de otra manera: debido a que, en el universo primitivo, en aquellos puntos de mayor densidad de materia y radiación, se podrían dar las condiciones para crearlos. Estos agujeros negros no tendrían spin, que se sabe que hay algunos que no tienen.

Esta es una manera de las pocas que hay hoy en día de explicar el que no tenga spin. Una manera de corroborarlo sería la existencia de un agujero negro con una masa menor que la masa de Chandrasekhar, la única manera de haberse formado sería por estos colapsos gravitacionales del universo primitivo, dándole un voto a favor a la teoría de la inflación.

Por último, a la hora de la colisión de dos agujeros negros, no chocan como las cosas del mundo cotidiano, es decir, frontalmente, si no que adoptarán un momento angular, e irán girando entre ellas, perdiendo energía en forma de ondas gravitacionales, y acercándose, siguiendo una espiral.

Una vez tenemos un poco más de idea de estos entes, continuemos con la detección más peculiar hasta el momento

2.9. SEGUNDA DETECCIÓN REVOLUCIONARIA

Recuerden el día: 17 de agosto de 2017, año en el que comenzaría la astronomía de multimensajeros.

Se detectó con LIGO y Virgo una onda gravitacional, y lo curioso de esto fue que el telescopio Fermi, a los dos segundos, detectó un pico de rayos gamma (Ver Fig. 4.).



Figura 4. Telescopio Fermi

Figure 4. Fermi Telescope

Fuente: <https://www.adn40.mx/noticia/ciencia/notas/2018-03-22-17-25/nasa-apaga-telescopio-fermi-por-anomalia>

Por la información extraída de las ondas gravitacionales y electromagnéticas, se dedujo que hace 144 millones de años, hubo una colisión entre dos estrellas de neutrones, produciendo una kilonova, y una gran emisión de luz, sobre todo de rayos gamma. Era una gran cantidad de materia la puesta en juego, que colisionaron a una velocidad relativa del 30% de la velocidad de la luz, y que podemos saber perfectamente de que estaba compuesto y en que medio se encontraba porque obtuvimos información de ella de dos maneras distintas.

Con esto, se puede deducir que la mayoría de los elementos se crean debido a colisiones de estrellas de neutrones.

Como ya dijimos, podemos triangular con ayuda de Virgo y LIGO en la bóveda, y con los telescopios podemos encontrar donde estaba, y se dedujo que se encontraba en NGC4493.

La consecuencia más importante, a parte de que pudimos observar un mismo fenómeno de dos maneras distintas y complementarias, es que la onda gravitacional y la electromagnética solo se diferencian en dos segundos; es decir, un evento que pasó hace 144 millones de años, nos lleguen con solo dos segundos de diferencia, que es un error más que admisible, es una clara evidencia de la similitud de la velocidad a la que se propagan: a la velocidad de la luz, otra de las cosas que ya predijo Einstein.

Dicha colisión, en contraste con la de los agujeros negros, tomó unos cien segundos en producirse, mientras giraban las estrellas de neutrones entre sí, adquiriendo más y más velocidad, hasta que colisionaron. Para más, ver [28, Bibliografía].

2.10. DETECCIONES HASTA LA FECHA

Por tanto, se han tomado durante los últimos cinco años, en total, unas cincuenta colisiones de agujeros negros y estrellas de neutrones de todo tipo (Ver Fig. 5).

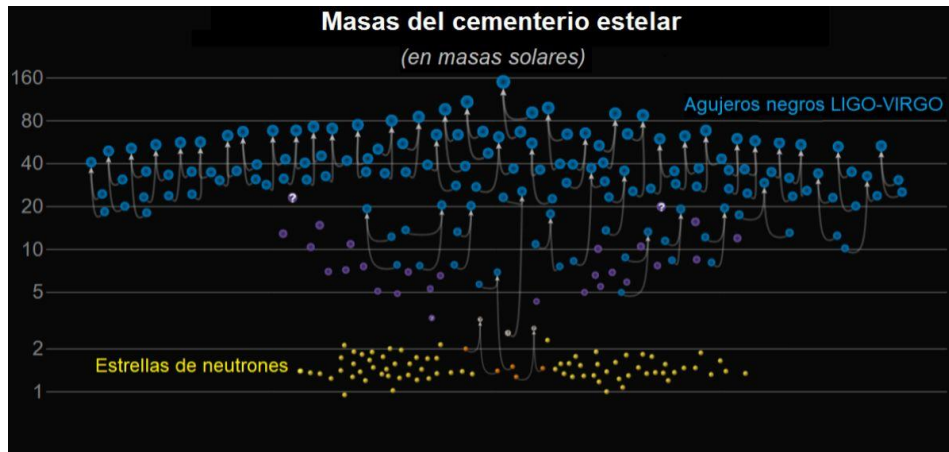


Figura 5. Masas del cementerio estelar
Figure 5. Masses in the Stellar Graveyard

Fuente: <https://e00-elmundo.uecdn.es/assets/multimedia/imagenes/2020/11/19/16058028288824.jpg>

Entre las colisiones a destacar, tenemos la más masiva hasta el momento, que fue la colisión de dos agujeros negros, uno de 85 masas solares, y otro de 66 masas solares.

Y otra colisión que trajo consigo bastantes dudas fue una entre un agujero negro, y otro cuerpo bastante peculiar para ser una estrella de neutrones, pero demasiado ligero para ser un agujero negro. ¿Sería un agujero negro primordial?

2.11. EL FUTURO

¿Qué ventajas tiene esta nueva manera de comprender el universo?

Con las ondas gravitacionales, ya no tenemos porque mirar al cielo para conocer, simplemente con una ondulación del espacio-tiempo, podemos conocer que objetos astronómicos chocaron, a que velocidades relativas, la frecuencia que nos llega, y la máxima amplitud que alcanzaron.

Podemos obtener información de objetos como los agujeros negros, de los cuales no podíamos obtener apenas con las ondas electromagnéticas, sobre todo porque no las emiten las últimas.

El primer paso de la observación al cielo con astronomía de multimensajeros se dio en 2017, y en el futuro, podríamos obtener incluso información, no solo con ondas electromagnéticas y gravitatorias, sino también complementarla con los neutrinos, unas partículas muy ligeras, que van casi a la velocidad de la luz, y que no interactúan con nada (son las llamadas partículas fantasma), e incluso con rayos cósmicos (partículas con una gran cantidad de energía debido a una gran exposición a una fuente de energía inmensa). Es decir, podríamos ver un fenómeno de cuatro maneras distintas, pudiendo obtener una gran cantidad de información que todavía no somos capaces de comprender.

El proyecto más ambicioso que se planea para 2034 se llama LISA, planeado por la Agencia Espacial Europea, consiste en mandar 3 satélites al espacio, separados entre ellas por una distancia entre un y cinco millones de kilómetros, para poder detectar ondas gravitacionales de frecuencias mucho menores.

Con esto, se busca responder muchas preguntas que todavía queda por resolver, tales como cual es el mecanismo que genera las explosiones de rayos gamma, cual es la historia de la expansión acelerada del universo, como se crean los agujeros negros, entre otras.

Una de las consecuencias directas de la teoría de la inflación es que debería de existir, al igual que hay un fondo de microondas, pues un fondo cósmico de ondas gravitacionales, producidas por el

universo temprano, de cuando se comenzaron a formar los átomos, o incluso de antes; del propio Big Bang.

Dichas ondas tendrían unas frecuencias menores a las que podemos medir hoy en día, y por ello LISA nos será una manera de corroborar o de echar abajo todas estas teorías.

3. CONCLUSIONES

Con todo lo que sabemos, podemos corroborar todo lo que nos predecía la relatividad general respecto a las ondas gravitacionales, y demostrarle a Einstein que, algo que parecía imposible como detectar dichas ondas, es en realidad posible. Gracias a ellas, podemos observar el universo de una nueva manera; no con los ojos, si no con la energía que desprenden los cuerpos debido a una variación de masa, o al movimiento en el espacio-tiempo.

De esta manera, podremos llegar a saber muchísimo más sobre los cuerpos más misteriosos del universo, incluso de instantes anteriores a la imagen más antigua que tenemos: la del fondo de microondas (el universo tenía una edad de 300 mil años), pudiendo saber, en un futuro posible, más cosas sobre el origen de nuestro universo, donde éste era opaco, y nos sería imposible obtener alguna otra imagen debido a ondas electromagnéticas.

Sin duda, el mayor salto de la astronomía fue lo de los multimensajeros, que nos permite ver un suceso de distintas maneras, cosa que se intensificará en un futuro.

¿Dónde nos llevará todo este estudio de las ondas gravitacionales? El tiempo y los experimentos tienen la respuesta.

4. AGRADECIMIENTOS

Quería agradecer al profesor de la asignatura, Antonio Ortiz, por la pasión que tiene por la asignatura, y por inspirarnos, y a Blanca Troughton por encaminarme por este camino de la física (profesora de matemáticas de segundo de Bachillerato del IES Los Manantiales, Málaga), quien me llevó a una charla de ondas gravitacionales expuesta por Alicia Sintés, a la que tuve el honor de conocer.

5. REFERENCIAS

Nota: Cuando se hace referencia a un documento en particular o pieza de información de una página web, incluya la cita dentro del texto y agregue la referencia correspondiente a la lista de referencias.

- (1) Ferrer, S. (2019). A mi edad podría descansar, pero las ondas gravitacionales son el principio de una gran historia. Recuperado de <https://www.agenciasinc.es/Entrevistas/A-mi-edad-podria-descansar-pero-las-ondas-gravitacionales-son-el-principio-de-una-gran-historia>
- (2) Chaparro, L. (2017). La fusión de dos estrellas de neutrones abre una nueva ventana al universo. Recuperado de <https://www.agenciasinc.es/Reportajes/La-fusion-de-dos-estrellas-de-neutrones-abre-una-nueva-ventana-al-universo>

- (3) Marín, D. (2017). Y LIGO detectó la fusión de dos agujeros negros por tercera vez. Recuperado de <https://danielmarin.naukas.com/2017/06/03/y-ligo-detecto-la-fusion-de-dos-agujeros-negros-por-tercera-vez/>
- (4) González, G. (2017). La historia detrás de la detección de ondas gravitacionales. Recuperado de <https://ideas.ted.com/la-historia-detras-de-la-deteccion-de-ondas-gravitacionales-por-pa/>
- (5) Huerta, M. (2020). Que son las ondas gravitacionales y cómo se originan. Recuperado de https://www.lasexta.com/noticias/ciencia-tecnologia/que-son-ondas-gravitacionales-como-originan_202009035f50d73a3fd2a1000125db55.html
- (6) Lazkoz, R. (2003). Ondas gravitatorias. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v49n4/v49n4a16.pdf>
- (7) (2021). Agujero negro. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Agujero_negro
- (8) (2021). Antony Hewish. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Antony_Hewish
- (9) (2020). Barry C. Barish. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Barry_C._Barish
- (10)(2021). Isaac Newton. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton
- (11)(2019). John Archibald Wheeler. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/John_Archibald_Wheeler
- (12)(2021). Joseph Hooton Taylor Jr. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Joseph_Hooton_Taylor_Jr.
- (13)(2020). Joseph Weber. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Joseph_Weber
- (14)(2021). Karl Schwarzschild. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Karl_Schwarzschild
- (15)(2021). Onda gravitatoria. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Onda_gravitatoria
- (16)(2021). Rainer Weiss. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Rainer_Weiss
- (17)(2021). Roger Penrose. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Roger_Penrose
- (18)(2021). Virgo (interferómetro). Recuperado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Virgo_\(interfer%C3%B3metro\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Virgo_(interfer%C3%B3metro))
- (19)Salvador, A. (2017). ¿Qué son las ondas gravitacionales? Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=aiK0EJPg9dk>
- (20)Santaolalla, J. (2017). ¿Qué son las ondas gravitacionales? Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=eTd-SWbZxao>
- (21)Pais, A. (2019). Qué es la teoría de la relatividad de Einstein y por qué fue tan revolucionaria
Recuperado de

<https://www.youtube.com/watch?v=oFbgfkh4cj8&list=PLLhUyPZ757&crTFv0q0Lb134UzgFe8735&index=29>

(22)LIGO Lab Caltech: MIT. (2016). The Sound of Two Black Holes Colliding. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=QyDcTbR-kEA>

(23)González, G. (2021). Einstein, agujeros negros y ondas gravitacionales. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=Yv9l15eCogE>

(24)García-Bellido, J. (2018). La nueva astronomía de ondas gravitacionales. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=ZHWl9wloiew>

(25)Pais, A. (2020). Qué son las ondas gravitacionales. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=OfHkEolNWFc>

(26)Santaolalla, J. (2016). ¿Qué son las ondas gravitacionales? Por Javier Santaolalla. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=06GjIRHQZRQ>

(27)Ortín, T. (2018). La Relatividad y las Ondas Gravitacionales. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=5rq3kC30M5Q>

(28)LIGO Virgo. (2017). Discovery Plot: GRB170817A. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=-Yt5EmEgz2w>