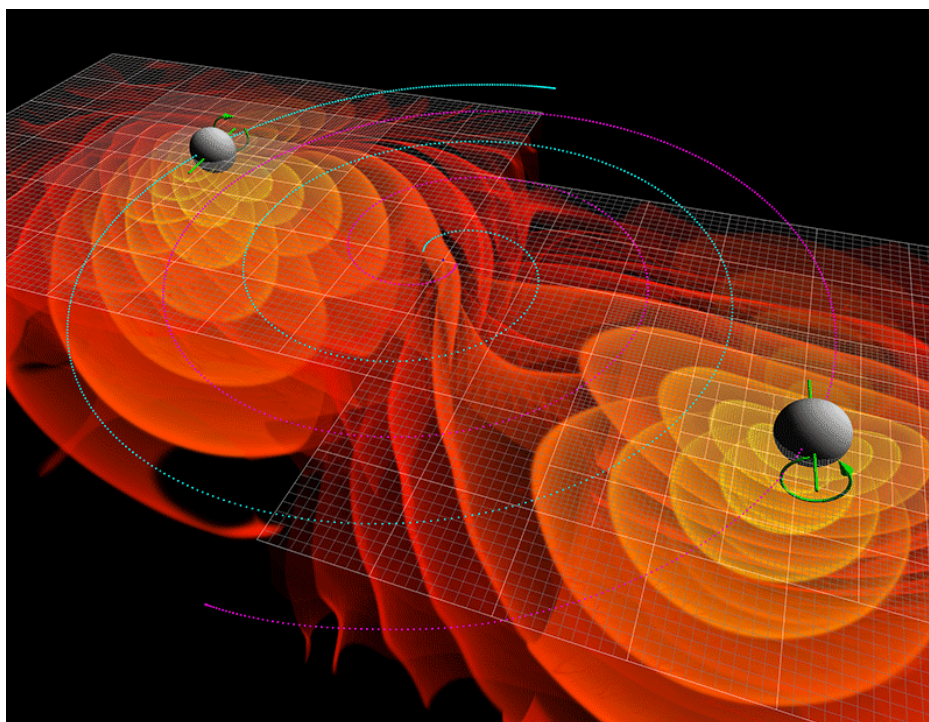


El Premio Princesa de Asturias 2017 de Investigación Científica y Técnica ha sido concedido a la colaboración LIGO y a sus fundadores por la primera detección directa de ondas gravitacionales emitidas en la fusión de dos agujeros negros

Juan García-Bellido, IFT-UAM/CSIC, 14/06/2017

Dos enormes interferómetros en Washington y Luisiana (EE.UU.) detectaron el pasado 14 de septiembre de 2015, por primera vez en la historia, la emisión de ondas gravitacionales generadas en los últimos instantes de la fusión de dos agujeros negros de unas 30 masas solares, abriendo una nueva era de la astronomía y la cosmología. El jueves 11 de febrero de 2016, pudimos seguir en directo la rueda de prensa que los fundadores del experimento, Reiner Weiss, Ronald Drever y Kip Thorne, dieron en Washington, en la sede de la National Science Foundation americana, describiendo la detección de la señal inequívoca de ondas gravitacionales emitidas por un sistema binario de agujeros negros que caen en espiral, el uno hacia el otro, y terminan fusionándose en otro agujero negro de mayor masa. Tal hazaña acaba de ser galardonada con el Premio Princesa de Asturias 2017 de Investigación Científica y Técnica.



Dos agujeros negros orbitando y cayendo en espiral el uno hacia el otro terminarán fusionándose en un agujero negro más masivo, emitiendo ondas gravitacionales durante todo el proceso.

La primera detección se produjo en la madrugada del 14 de septiembre de 2015 en los interferómetros gemelos de Livingston (Luisiana) y Hanford (Washington). La señal consiste en una oscilación de amplitud y frecuencia variable, que crece hasta un máximo en el momento de la fusión y luego desaparece. Ambos detectores vieron dicha señal de manera inequívoca, por lo que los investigadores de la colaboración LIGO sabían que estaban ante un hito de la historia de la ciencia. Desde entonces han sido descubiertas tres fusiones más de sistemas binarios de agujeros negros, hasta distancias de miles de millones de años luz de la Tierra, abriendo una nueva ventana a la exploración del Universo.

Pero antes de describir en qué ha consistido la detección y qué consecuencias tiene para la ciencia y la sociedad, dejadme empezar describiendo qué son las ondas gravitacionales, qué las genera y cómo se propagan hasta nosotros.

¿Qué son las ondas gravitacionales?

Las ondas gravitacionales fueron predichas por Einstein en 1916, poco después de formular sus ecuaciones de la relatividad general, cuyo centenario celebrábamos hace tan solo unos meses. Se trata de deformaciones en la estructura del espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz. En lenguaje coloquial se podría decir que son arrugas en el espacio-tiempo, que se generan cuando un fenómeno gravitacional violento ocurre en el espacio y en el tiempo. Este fenómeno puede ser astrofísico, como la explosión de una supernova o la colisión de dos agujeros negros, o bien el estallido inicial de la gran explosión que dio lugar a nuestro universo.

Las ondas gravitacionales tienen, como la luz, una amplitud y una frecuencia variable. Las que fueron detectadas por LIGO generaron desplazamientos relativos de una parte en 10^{21} a frecuencias de entre 35 y 150 pulsaciones por segundo (Hz). Estas frecuencias son próximas a las de la voz humana (un poco más graves) y es por eso que los investigadores

usan la analogía sonora para representarlas de una manera que podamos "sentirlas" con nuestros sentidos. Pero cuidado con la analogía, pues eso no quiere decir que podamos oírlas como escuchamos música, ya que no son ondas de presión en un medio, como el sonido, sino ondas transversas como la luz, que distorsionan el propio espacio-tiempo.

Si de verdad pudiéramos aumentar la intensidad de las ondas gravitacionales un factor 10^{20} , lo que sentiríamos es algo muy desagradable: nuestro cuerpo se dilataría y contraería en direcciones opuestas, con una frecuencia de cientos de oscilaciones por segundo, que aumenta de intensidad y crece en frecuencia con el paso del tiempo, lo que se asemejaría más a un centrifugado en el tambor de una lavadora que a un prelude de Bach.

¿Qué genera ondas gravitacionales?

De igual manera que una carga oscilante genera ondas electromagnéticas, las ondas gravitacionales se producen cuando una gran distribución de masa se mueve a velocidades relativistas y sufre un cambio en su aceleración. Ambas ondas, electromagnéticas y gravitacionales, se mueven a la velocidad de la luz desde la fuente hasta el detector, por lo que un evento como el que detectaron los interferómetros de LIGO tuvo que ocurrir a enormes distancias para que 1300 millones de años más tarde fuera detectado en la Tierra.

Pero no solo las supernovas y el origen del universo generaron ondas gravitacionales. Todos los cuerpos acelerados producen estas ondas, aunque su intensidad es tan débil que no las detectamos. De hecho, es posible calcular el ritmo de emisión de ondas gravitacionales por el Sol y resulta ser de 100 millones de vatios, que comparado con los 4×10^{26} vatios emitidos en forma de ondas electromagnéticas resulta patético. Sin embargo, la emisión de ondas gravitacionales por la fusión de los agujeros negros detectada por LIGO tuvo la potencia de 4×10^{49} vatios, equivalente a 10^{23} soles, luego fue más luminoso que todas las estrellas del universo juntas. Sin embargo, debido a la enorme distancia a la que se encontraba, su efecto en la Tierra fue minúsculo.

El proceso más violento que ocurrió en el universo fue el origen de toda la materia y radiación al final de la inflación cosmológica, cuando el universo tenía fracciones infinitesimales de segundo. Este proceso, conocido como el recalentamiento del universo, generó una enorme cantidad de ondas gravitacionales que aún permean nuestro entorno, como el fondo de radiación de microondas, testigos del origen caliente de nuestro universo. Este fondo estocástico de ondas gravitacionales aún no ha sido descubierto y, siguiendo la analogía sonora anterior, se asemejaría al ruido cacofónico de una orquesta, con cada instrumento afinando a una nota distinta de forma aleatoria, pero con un espectro que tiene una amplitud máxima a frecuencias enormes, cerca del GHz, miles de millones de ciclos por segundo. Descubrir ese fondo abriría las puertas al mismísimo origen del universo. Por el momento no existen detectores suficientemente sensibles a las frecuencias de GHz, o longitudes de onda de centímetros. Habrá que desarrollar nuevas tecnologías para acercarse a ese fondo a nuestros sentidos.

¿Cómo se detectan las ondas gravitacionales?

La interacción gravitacional es tan débil que el efecto de una onda gravitacional sobre la materia es casi inapreciable. Además, como la mayoría de los eventos cataclísmicos que dan lugar a una luminosidad suficientemente potente de ondas gravitacionales están muy lejos, estas llegan a la Tierra con una amplitud muy reducida. Esto hace que, a pesar de deducir su existencia hace un siglo a partir de sus ecuaciones, Einstein siempre pensó que nunca se llegarían a detectar. La mejor manera de detectar una onda gravitacional es medir su influencia sobre un conjunto de enormes masas cuya posición conocemos bien. En los años sesenta del siglo pasado, Joseph Weber propuso y llegó a construir en la Universidad de Maryland una enorme barra resonante de aluminio que actuaba como una campana, de manera que una onda gravitacional suficientemente potente podría llegar a "tañerla" dejando una señal de su paso. Hasta el momento no se ha llegado a detectar nunca una onda gravitacional con este tipo de detectores.

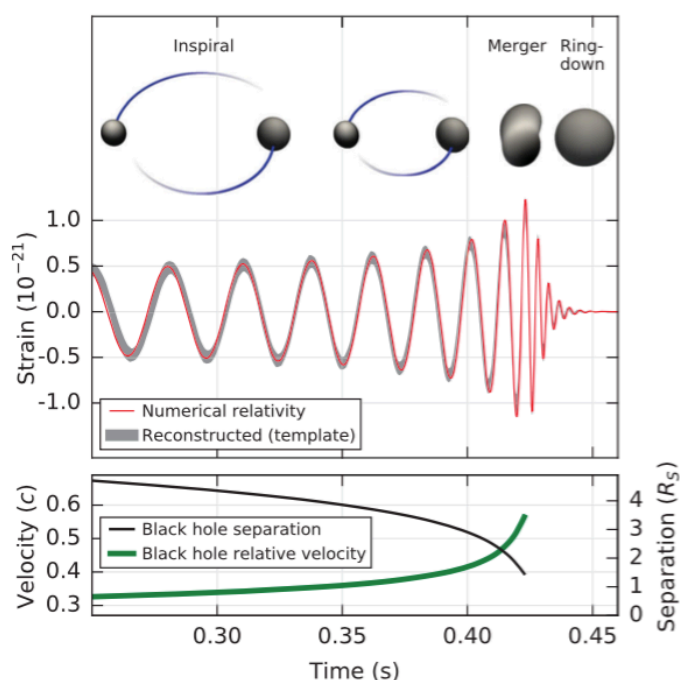
Una forma indirecta de detectar la presencia de ondas gravitacionales es medir la pérdida de energía por emisión de ondas gravitacionales de un sistema binario de estrellas de neutrones orbitando una alrededor de la otra. La posición de las estrellas se conoce con extraordinaria precisión gracias al potentísimo haz colimado de ondas de radio que emiten y que son detectados por radiotelescopios. En particular, el primer pulsar binario, descubierto por Hulse y Taylor en 1974 con el telescopio de Arecibo, permitió medir durante décadas su pérdida de energía y confirmar que lo hacía exactamente como predecía la teoría de la relatividad general. Este descubrimiento les valió el premio Nobel en 1993.

Por otra parte, en los años setenta, un grupo de Caltech (Ronald Drever y Kip Thorne) y el MIT (Reiner Weiss), propusieron la idea de un interferómetro láser de tipo Michelson entre cuatro espejos muy masivos, de manera que

la posición relativa de los espejos se podía conocer con extraordinaria precisión y así detectar el paso de una onda gravitacional. Después de cuatro décadas, la idea finalmente ha dado sus frutos y el experimento LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) ha logrado detectar por primera vez dicha onda proveniente de la fusión de dos agujeros negros muy masivos. Ha sido necesario llegar a una sensibilidad increíble, de unas partes en 10^{21} , es decir ser capaces de distinguir desviaciones miles de veces más pequeñas que el tamaño de un protón en distancias de kilómetros (los brazos del interferómetro). Esto sólo es posible porque la onda mueve a su paso los espejos de forma coherente, sacando fuera de fase los dos haces de luz que interfieren en el fotodetector.

¿Qué se ha observado exactamente?

Lo que se ha visto en LIGO ha sido una oscilación periódica de los espejos del interferómetro, con una frecuencia y una amplitud característica predicha por la relatividad general, que permite conocer la masa y distancia relativa de los agujeros negros durante la caída en espiral, así como predecir y medir la masa del agujero negro resultante de la fusión.



El proceso de fusión de los dos agujeros negros y la señal ondulatoria que vemos en el detector como consecuencia de la onda gravitacional emitida.

La señal se ha detectado de forma independiente tanto en el detector de Livingston (Luisiana) como en Hanford (Washington), con una fase y un retraso temporal de 7 milisegundos, que corresponde exactamente con lo que esperaríamos de un suceso de fusión de dos agujeros negros de 29 y 36 masas solares a una distancia de 410 megaparsecs (1300 millones de años luz). El resultado de la fusión ha sido un agujero negro de 62 masas solares y la conversión en menos de un segundo de 3 masas solares de energía en forma de ondas gravitacionales. El propio espacio-tiempo se deforma violentamente en la fusión y se relaja posteriormente (ringdown), emitiendo una enorme cantidad de energía en forma de una perturbación del espacio-tiempo que viaja a la velocidad de la luz y que llamamos onda gravitacional.

¿Qué implicaciones tiene esta detección para la cosmología y la física fundamental?

Esta primera detección de ondas gravitacionales es el comienzo de una nueva era de la astronomía. Si el siglo XX fue el siglo de la exploración del universo gracias a las ondas electromagnéticas de todas las frecuencias, de radio a los rayos gamma, este siglo XXI seremos capaces de explorar el universo con una nueva sonda, las ondas gravitacionales, como comentaba yo en mi blog hace cinco años. Nos va a permitir explorar la naturaleza de la materia oscura y la energía oscura. En concreto, la emisión de ondas gravitacionales es tan precisa que podemos calibrar las fuentes con nuestros conocimientos de relatividad general y por tanto podemos usar estos eventos de fusión de agujeros negros como "sirenas estándar" para determinar con precisión las distancias a las galaxias lejanas, similar a lo que hacemos ahora de forma rutinaria con las supernovas de tipo Ia como candelas estándar. De esta manera, es posible deducir el contenido de materia y energía que da lugar a la expansión acelerada del

universo, y descubrir, por ejemplo, la naturaleza del campo responsable de dicha aceleración.

Por otra parte, la precisión de las medidas hechas por estos detectores es tan extraordinaria que podemos usar estas observaciones para testar la teoría de la relatividad general en régimen de campo fuerte y plantearnos la posibilidad de que en un futuro detectemos pequeñas desviaciones respecto a las predicciones de la relatividad general, que nos indiquen la necesidad de buscar una teoría de la gravedad más allá de la relatividad general, posiblemente con nuevos efectos de gravedad cuántica.

¿Cuál es el futuro de estos detectores?

La primera detección de ondas gravitacionales ha ocurrido en el rango de los cientos de hercios. En un futuro próximo tendremos una red de telescopios de ondas gravitacionales funcionando a distintas frecuencias (debido a la longitud de los brazos) entre décimas de hercios y unos kilohercios. Dentro de una década la Agencia Espacial Europea pondrá en órbita alrededor del Sol un conjunto de satélites llamado LISA, con un interferómetro de millones de kilómetros de brazo, que será sensible al rango de frecuencias de los milihercios, abriendo la exploración de las fusiones de los agujeros supermasivos que se encuentran en el centro de las galaxias.

El avance tecnológico que ha sido necesario para llegar a construir el experimento LIGO será el precursor de desarrollos aún más novedosos, con nuevos materiales y tecnologías, para explorar la detección de ondas gravitacionales a todas las frecuencias posibles, incluso aquellas que podrían darnos información de los primeros instantes del universo y de la naturaleza de la materia oscura.

Acabamos de entrar en una nueva era.

Es más que probable que Reiner Weiss, Kip Thorne y Barry Barish reciban el Premio Nobel de Física de este año.

¡Enhorabuena!