

Un gran descubrimiento. Las ondas gravitacionales.

David Sierra Porta, PhD

Centro de Modelado Científico, CMC

Universidad del Zulia – Venezuela

dsporta@cmc.org.ve

El día de hoy, 11 de febrero de 2016, se ha producido una noticia muy importante. Se ha comunicado de la medición de ondas gravitacionales en el universo. El anuncio se dio por parte de investigadores del experimento LIGO, diseñado específicamente para este fin. La importancia que reviste la medición de este tipo de ondas radica en que representan una evidencia de la teoría de la Relatividad General, quizás de una de las últimas comprobaciones que estaban pendientes y una de las más fascinantes e importantes. Tras el anuncio, Gabriela González, portavoz de LIGO y profesora de la Universidad Estatal de Louisiana, explicó con detalle como el 14 de septiembre de 2015 fueron localizadas por primera vez en el observatorio de Livingston (Louisiana) señales proveniente de las nubes de Magallanes, de dos pequeñas galaxias cercanas a la Vía Láctea que, siete milisegundos después fueron detectadas también por el detector de Hanford en el estado de Washington. Estas ondas eran exactamente lo que esperaríamos según las previsiones que hizo Einstein en 1916.

Primero que nada, acerquémonos al entendimiento de lo que se ha encontrado. Una onda gravitacional, es en esencia eso, una onda, pero en este caso es una onda producida en el tejido del espacio-tiempo, es decir, en la geometría de nuestro universo la cual es producida por un objeto muy masivo que se está moviendo a gran velocidad. Este tipo de ondas son muy especiales y se producen como una consecuencia (una hipótesis hasta hace poco) de la teoría de la Relatividad General de Einstein (descubierta hace 100 años) y además se transmiten a la velocidad de la luz. Uno pudiera hacerse una idea de lo que ocurre con un ejemplo muy sencillo. En la física de fluidos se conoce con el nombre de onda de choque a una onda de presión muy violenta que se produce cuando un objeto viaja a mayor velocidad que la velocidad del sonido del medio en cuestión. De este modo cuando esto pasa, se combinan una cuantas variables físicas en la cual se producen diferencias de presión extremas y aumentos abruptos de temperatura. Lo que ocurre inmediatamente es la producción de una onda de frente en el medio. Los perfiles de onda producidos por aviones supersónicos son un ejemplo de esto. También las ondas producidas por bombas de detonación muy poderosas capaces de romper o destruir objetos a la distancia, son un ejemplo de esto. Otro ejemplo que podemos imaginar es el de los meteoritos que entran a nuestra atmósfera, los cuales producen también este tipo de ondas de choque, en el cual el aumento de la temperatura producido por dicha onda es la responsable que podamos ver la trayectoria de los mismos al caer.

La Relatividad General es una teoría bastante consistente, incluso en muchos aspectos con la teoría Especial de la Relatividad. De hecho, uno de los supuestos o principios más importantes es que nada material puede moverse a mayor velocidad que la velocidad de la luz. Es decir, que la máxima velocidad permitida tiene un límite y no puede sobrepasar el valor de $c=299792458$ m/s. Lo que implica esto es que cualquier radiación o evento, o partícula, no puede ocurrir o estar en todos (o en dos lugares) los lugares del universo en el mismo instante, cualquiera que sea el evento que ocurra debe propagarse por el espacio-tiempo, esto significa que debe viajar una distancia en un tiempo que no puede ser infinitamente cero. De tal manera que una partícula

que se mueve a la velocidad de la luz (un fotón) se propagará en el espacio-tiempo a la velocidad de la luz y causará algunos cambios en su trayectoria, a estos cambios es lo que se denomina una onda gravitacional. Además, lo que nos dice la Teoría de la Relatividad General es que existen objetos que pueden transformar su masa en energía a través de una ley de correspondencia masa-energía, cuando estos objetos hacen esto las perturbaciones que se producen a su alrededor (muy violentas) deforman el espacio-tiempo y producen estas ondas en cuestión.

El espectro de ondas gravitacionales es completamente inexplorado, y cada vez que una nueva banda de ondas electromagnéticas se ha abierto a la astronomía, los astrónomos han descubierto fenómenos completamente inesperados. Esto parece igual de probable que vuelva a ocurrir con las ondas gravitacionales, especialmente porque las ondas gravitacionales llevan algunos tipos de información que la radiación electromagnética no puede transmitir. Las ondas gravitacionales son generadas por los movimientos aparentes de las masas, que codifican las distribuciones de masa y velocidades. Son coherentes y sus frecuencias bajas reflejan los tiempos dinámicos de sus fuentes.

Las ondas gravitacionales son muy débiles. Las más fuertes que se podría esperar observar en la Tierra serían generadas por acontecimientos muy distantes y antiguos, como la colisión de dos estrellas de neutrones o la colisión de dos agujeros negros súper masivos, en los cuales una gran cantidad de energía se movió violentamente. Tal onda debería causar cambios relativos en distancia por todas partes en la Tierra, pero estos cambios están en un orden de menos de una parte en **10^{21}** .

Por sus características y por el hecho de que se necesita una gran cantidad de energía, la fuente más importante para descubrir ondas gravitacionales son los agujeros negros supermasivos. Otras fuentes de ondas gravitacionales pueden venir de explosiones de supernovas, formaciones de agujeros negros, el choque de estrellas de neutrones o agujeros negros, rotaciones no homogéneas de estrellas de neutrones, o bien, por la radiación remanente de fondo producida luego del Big Bang, esta última nos daría información demasiado valiosa acerca de la creación primigenia del universo. Para tener una pequeña idea, las explosiones estelares tienen una energía superior a billones de billones de bombas atómicas. Además la colisión de dos agujeros negros no es un fenómeno muy frecuente y por si fuera poco ocurren a millones de años luz de nuestro sistema solar, por lo que si ocurre un evento de estos, las ondas que nos llegarían aquí darán información de millones de años atrás y serían tan débiles que sería un desafío tecnológico enorme medirlas.

Para poder determinar la evidencia de ondas gravitacionales se han diseñado para tales efectos varios experimentos y de muy variadas maneras. El primer indicio de ondas gravitacionales provino de el investigador J. Webber (Universidad de Maryland) en los años 60. En 1958 comenzó a diseñar un dispositivo capaz de detectar las ondas gravitacionales predichas en la teoría general de la relatividad de Einstein. En 1965 terminó su construcción, habiendo fabricado un detector cilíndrico de aluminio de un metro de diámetro y 3,5 toneladas de peso. Alrededor del cilindro se hallaban una serie de cristales piezoeléctricos, los cuales generaban un voltaje cuando la barra oscilaba de tamaño. El propio Weber sostenía que el aparato era capaz de detectar deformaciones de tan sólo una parte en 10^{16} , lo que supone la cienava parte del diámetro de un núcleo atómico. Weber aisló el cilindro en el vacío para evitar otros efectos, tales como la acústica, la temperatura, o los sismos.

Sin embargo, no se conformó y construyó un segundo detector en el "Argonne National Laboratory" de Chicago. De este modo, sólo se reconocerían como ondas gravitatorias las que afectasen a ambos detectores. En 1968 experimentó la primera coincidencia, y dos años más tarde, en 1970, se percató de que dichos efectos alcanzaban un pico cuando ambos se encontraban orientados hacia el centro de la galaxia. Esto desencadenó la construcción de otros detectores en varios países y alianzas, sin embargo, desafortunadamente no pudieron ser confirmadas las observaciones por ninguno de los grupos.

El experimento de Glasgow/Garching en 1989 fue el primero realizado con estos detectores desarrollados en el MIT, Garching, Glasgow, Caltech y Tokio, en este caso con radiointerferómetros o interferómetros láser. Este descubrimiento experimental se considera como la demostración de la existencia de ondas gravitacionales. Por este motivo, Hulse y Taylor recibieron el Premio Nobel de Física del año 1993. Más recientemente (2005), se ha descubierto un segundo púlsar binario, PSR J0737-3039, cuyo comportamiento parece confirmar también las predicciones de la relatividad general con respecto a la energía emitida en forma de ondas gravitacionales. El púlsar binario tiene una órbita cuya distancia decae en unos 7 mm por día. En marzo de 2014, astrónomos del Centro de Astrofísica Harvard-Smithsoniano (CFA) anunciaron la detección por primera vez las ondas gravitacionales durante el período explosivo de crecimiento del universo llamado inflación. Los hallazgos fueron realizados con la ayuda del BICEP2, un telescopio situado en el Polo Sur, durante experimentos llevados a cabo desde 2006 que buscaban anomalías en la polarización de la radiación de fondo de microondas. Sin embargo, más adelante, otros grupos señalaron la presencia de unos artefactos experimentales que podrían afectar a las observaciones. El 11 de febrero de 2016 se confirma por primera vez la detección directa de ondas gravitacionales.

Lo que se anunció hoy día consiste en que el Observatorio de Interferometría Láser de Ondas Gravitacionales (LIGO), en EE UU, ha captado las ondas producidas por la fusión de dos agujeros negros. Sería la primera vez que se captan ondas gravitacionales y esto sucede justo un siglo después de que Einstein predijera su existencia. Hasta ahora solo había pruebas indirectas de estas ondas. Se hizo con un experimento al que llaman LIGO. El LIGO es un gran instrumento óptico de precisión desarrollado por los institutos tecnológicos de California (Caltech) y Massachusetts, (MIT) y la Colaboración Científica LIGO, en la que participan unos 1.000 investigadores de 15 países. La instalación consta de dos detectores láser con forma de L. Cada brazo de esa L tiene cuatro kilómetros y hay dos detectores idénticos, uno en Luisiana y otro a 3.000 kilómetros en el estado de Washington. LIGO puede identificar variaciones equivalentes a una diezmilésima parte del diámetro de un átomo, la medición más precisa jamás lograda por un instrumento científico. Estos detectores llevan buscando ondas gravitacionales desde el año 2002. En septiembre de 2015 comenzó a funcionar el LIGO avanzado, una versión mejorada del detector que multiplica por 10 la sensibilidad de los brazos láser y por tanto la distancia a la que pueden captar ondas gravitacionales. La señal venía de una fusión que sucedió hace 1.300 millones de años (un evento ocurrido cuando la tierra estaba dando sus primeros pasos!!) y consistió en el violento abrazo de dos agujeros negros cuya masa es entre 29 y 36 veces mayor a la del Sol. Los dos agujeros se fundieron en uno liberando una energía equivalente a tres masas solares, que salió despedida en forma de ondas gravitacionales en una fracción de segundo. Y todo este proceso de masa transformándose en energía en fracciones de segundo lo describe a la perfección la ecuación más famosa del mundo $E=mc^2$ [La energía es igual a la masa por la velocidad de la luz

al cuadrado]. En realidad la detección se produjo el 14 de septiembre del año 2015 en la cual teniendo señales esperadas se produjo un pico en la intensidad de la señal de ambos detectores cerca de 40 Hz y se elevó a más o menos 250 Hz en menos de 30 milisegundos.

La señal se captó primero en los detectores del LIGO ubicado en Luisiana y 7 milisegundos después en Hanford. Vale la pena entender como es que podemos estar seguros de que dicha señal es en realidad la que corresponde a la detección de ondas gravitacionales. La extraordinaria sencillez de todo el experimento es la que deja ver como es que puede ser reconocida esta señal. Muchos seguros hemos sabido de los instrumentos que usan algunos músicos para afinar sus guitarras. Consisten de unos aparatos electrónicos que pueden medir la frecuencia de vibración de una cuerda cuando está vibra, de esta manera el músico sabrá cuando está afinada en la medida que dicho instrumento muestre la frecuencia correcta para la cuerda tocada. En el LIGO pasa más o menos lo mismo. Una parte del experimento consiste en simular computacionalmente muchos y diferentes patrones de perturbaciones tipo ondas, de tal manera que las computadoras pueden inferir que cuando se detecta algo, esta señal es proveniente de tal o cual fenómeno. La indudable señal física detectada es la que corresponde a la señal ya modelada computacionalmente para objetos (en este caso agujeros negros) colisionando liberando una gran cantidad de energía en el universo.

La detección de ondas gravitacionales permite decirnos muchas más cosas. Hay aspectos muy interesantes y se abren muchas más motivaciones para estudiar la gravedad. En particular las ondas gravitacionales que, al ser generadas por los movimientos aparentes de las masas, codifican las distribuciones de masa y velocidades. Son coherentes y sus frecuencias bajas reflejan los tiempos dinámicos de sus fuentes. Recordemos bien que este tipo de ondas al transmitir energía, llevan consigo un tipo de información que no son capaces de transmitir las ondas electromagnéticas. Esto quiere decir que las ondas gravitacionales emitidas en la fusión de dos agujeros negros permitirá estudiar la física de los horizontes de sucesos con gran detalle. Cuando dos agujeros negros se fusionan resulta un nuevo agujero negro cuyo horizonte es dinámico, vibra como una membrana, produciendo una marca en las ondas gravitacionales muy distintiva. Su observación será mucho más limpia que la que se puede obtener gracias a las ondas electromagnéticas emitidas en los discos de acreción de materia. La no linealidad de las ecuaciones de Einstein se muestra en todo su esplendor durante este fenómeno. En los últimos minutos de vida de sistemas binarios formados por dos agujeros negros se alcanzan velocidades muy altas ($v/c > 0,3$), hasta dos órdenes de magnitud mayores que las alcanzadas en los púlsares dobles que podemos observar mediante ondas gravitacionales de forma indirecta. Además, se alcanzan campos gravitacionales enormes y altamente dinámicos, con enormes curvaturas del espacio-tiempo. La información que ganaremos sobre los agujeros negros será capital para nuestra comprensión de estos objetos compactos que aún guardan muchos secretos. Una predicción de la Relatividad General consiste en que las ondas gravitacionales se propagan en el espacio-tiempo a la velocidad de la luz en el vacío. Este hecho implica que los gravitones (que forman las ondas gravitacionales) son partículas sin masa. Hay teorías alternativas que predicen que el gravitón tiene masa y, por tanto, las ondas gravitacionales se propagan a una velocidad menor que la de la luz en el vacío. Dichas teorías podrían ser descartadas. Así que si, por ejemplo, LIGO y Virgo detectasen las ondas gravitacionales de un evento cósmico, y encontraran que las ondas tardaron un poco más en llegar a la Tierra que el estallido asociado de rayos gamma detectados por un telescopio más convencional, eso podría tener consecuencias trascendentales para la física fundamental.

La Relatividad General también predice que las ondas gravitacionales (y los gravitones) tienen sólo dos polarizaciones, como las ondas electromagnéticas. En otras teorías alternativas estas ondas pueden tener hasta seis polarizaciones diferentes (dos escalares, dos vectoriales y dos tensoriales). La detección directa de ondas gravitacionales permitirá verificar esta predicción. La detección simultánea de ondas gravitacionales y ondas electromagnéticas emitidas por la misma fuente permitirá poner límites a las violaciones de la simetría de Lorentz en el sector gravitacional. Bastaría observar las emitidas en la fusión de estrellas de neutrones en un sistema binario que va acompañada de la emisión de una explosión corta de rayos gamma (ondas electromagnéticas). Las teorías de gravedad cuántica suelen construirse modificando la acción de Hilbert–Einstein (normalmente, mediante correcciones cuadráticas en los invariantes de la curvatura). Estas correcciones modifican la estructura íntima de los agujeros negros y de las estrellas de neutrones. Las ondas gravitacionales permitirán poner límites a estas teorías y abrir el camino hacia una futura teoría cuántica de la gravedad. Definitivamente vivimos tiempos de cambios muy interesantes, demasiados adelantos han ocurrido en la década que vivimos. Hace muy poco se había anunciado el descubrimiento de la partícula de Higgs para el modelo estándar, una comprobación experimental necesaria desde hacía muchos años para ir completando el puzzle de partículas de las que está constituido toda la materia que conocemos y el universo en efecto. Hoy le toca el anuncio a las ondas gravitacionales y contamos con la dicha y la suerte de vivir en estos tiempos. Lo que viene es muy bueno puesto que esto abre una ventana de investigación invaluable para la comprensión del cosmos. Nos dice aún más, que para todos los que trabajamos apasionados en los campos de la Relatividad General, tenemos evidencia directa de que lo que hacemos está bien puesto que la teoría produce buenos resultados y confirmaciones. Así todo lo que hemos hecho está soportado en una base teórica muy fuerte y profunda.