

# ¿QUÉ SON LAS ONDAS GRAVITACIONALES Y PARA QUÉ SIRVEN?

Julio ALBERT FERRERO  
Vicealmirante (2.ª Reserva)

El concepto de las ondas gravitacionales presenta cierta dificultad de comprensión porque requiere el conocimiento del espacio cuatridimensional que se expone a continuación.

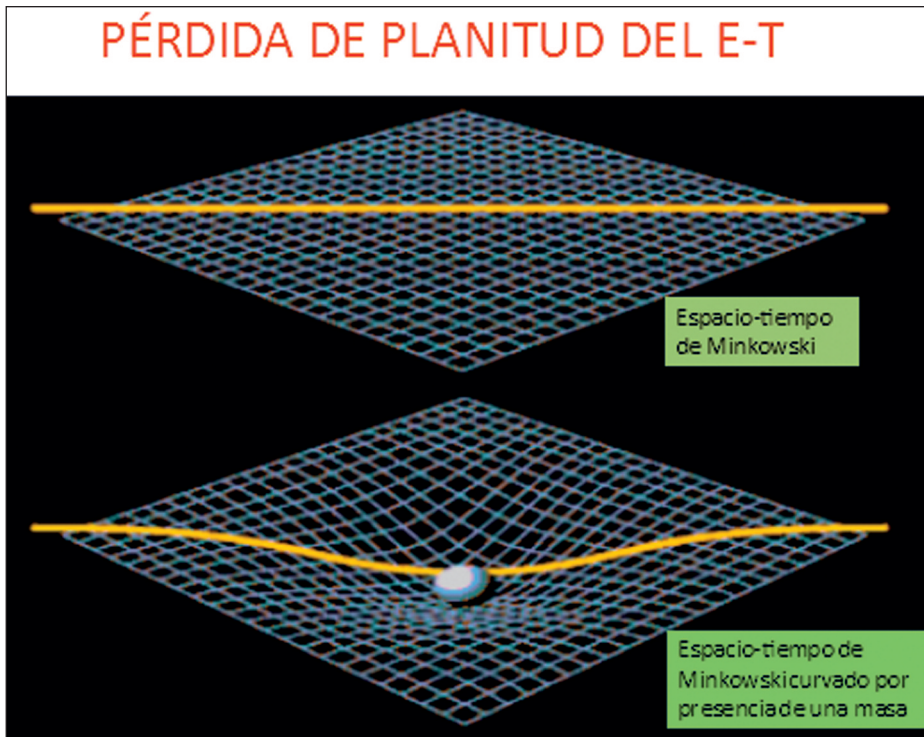
El matemático lituano Minkowski concibió el espacio cuatridimensional formado por las tres componentes espaciales y el tiempo, pero no como elementos independientes sino íntimamente relacionados, dando lugar al conocido Espacio Tiempo (E/T) de Minkowski. Da entrada al tiempo como distancia temporal, que es una dimensión geométrica y no es una adición a las otras tres dimensiones. Introduce la velocidad de la luz como un valor máximo.



En la figura anterior (original del Dr. Surroca) se expone claramente la existencia del espacio de las cuatro dimensiones, partiendo de dos sucesos, entendiendo este último concepto como el punto integrante del E/T —en el espacio habitual es la posición—, cuya distancia geométrica (medida en las tres dimensiones espaciales) en el eje de las abscisas es lo que podemos llamar el espacio geométrico y la distancia en el eje de las ordenadas, se le denomina espacio temporal, proyección del segmento formado por los dos sucesos y cuyo valor sería la velocidad de la luz ( $c$ ) multiplicada por el tiempo que tardaría la luz en ir de una posición a la otra.

El E/T de Minkowski se comporta como si estuviese descansando sobre una malla elástica plana como la de la figura adjunta. Esta malla se curva, es decir el E/T se curva cuando aparece una gran masa como la de un cuerpo celeste (como en la figura siguiente) o con el choque de dos cuerpos celestes que producen una perturbación del E/T que genera las ondas gravitacionales que se trasladan a la velocidad de la luz.

Las ondas gravitacionales son ondas transversales, es decir que se propagan perpendicularmente a su formación, como ocurre en las ondas electromagnéticas, a diferencia de las ondas sonoras formadas por contracciones y

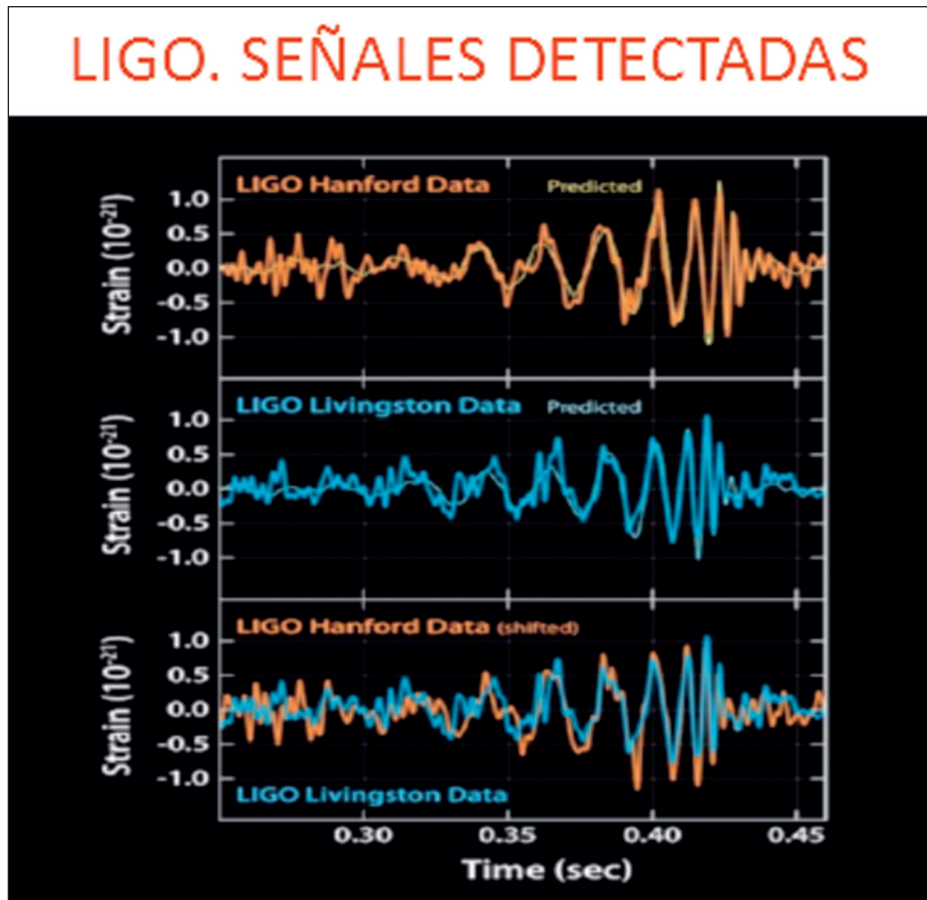


## ¿QUÉ SON LAS ONDAS GRAVITACIONALES Y PARA QUÉ SIRVEN?

expansiones en el sentido longitudinal. Las ondas gravitacionales también se producen cuando un cuerpo celeste, como los planetas y las estrellas se aceleran, y se propagan alejándose de su fuente de forma similar a los movimientos oscilatorios de las ondas en la superficie. Prometen abrir una ventana sobre el Universo. Se llevan siempre la energía de donde proceden.

Se han detectado en una gran masa como el de las estrellas binarias, que son cuerpos estelares que se componen de dos que orbitan manteniéndose alrededor de su centro y se propagan a la velocidad de la luz desde los lugares donde se aceleran rápidamente. Según Einstein cuando dos cuerpos celestes chocan en el espacio se generan varias ondas cuya extensión dependerá de la violencia del choque.

El E/T de Minkowski fue utilizado por Einstein en su Teoría de la Relatividad que intuyó que las amplitudes de las ondas gravitacionales serían signifi-



cativamente pequeñas. Además, hasta la conferencia de Chapel Hill, en 1957, hubo un significativo debate acerca de su realidad física, pero no se consiguió su detección directa hasta el 2015. En septiembre del 2015 se detectaron por primera vez las ondas gravitacionales (ver figura siguiente) gracias a los interferómetros de Landford en el Estado de Washington en el Pacífico y Livingston en Louisiana (de 7 milisegundos de desfase como puede observarse en la figura) cuyo conjunto forman el sistema LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*), el mayor del mundo, gracias a la fusión de agujeros negros que habían estado orbitando entre sí hasta que se fusionaron emitiendo las señales de las ondas gravitacionales. El interferómetro es un instrumento que emplea las interferencias de las ondas de luz para medir, con gran precisión, las longitudes de ondas de la misma luz. Hay muchos tipos de interferómetros, en todos ellos se utilizan dos haces de luz que recorren dos trayectorias ópticas distintas determinadas por un sistema de espejos y placas que al final convergen para formar un patrón de interferencias.

En la figura se muestran las ondas gravitatorias detectadas por los dos interferómetros del Sistema LIGO.

También en 1916 Schwarzschild publicó una solución de las ecuaciones de campo, que más tarde fue comprendida para describir un agujero negro, que es un cuerpo celeste con un campo gravitatorio muy fuerte en el que ni siquiera la luz puede escapar y también puede definirse como una gran concentración de masa en el que existe un valor alto de la gravedad que no permite salir de él ninguna luz, y por eso es negro.

En el ámbito local se pueden producir ondas gravitacionales mediante el acercamiento de dos masas, o bien con la presencia de un rayo de luz tangente a una que produzcan la curvatura de su E/T de Minkowski local. Por lo tanto, estas ondas se pueden producir tanto en el macrocosmo astronómico como en nuestro entorno y con grandes diferencias en frecuencia y longitud de onda, lo que supone una ampliación del campo de utilización.

En 1974 Weber realizó la primera detección indirecta de la teoría por observación del sistema binario de estrellas de neutrones (denominadas pulsares), que son estrellas pequeñas con fuertes campos gravitatorios y que giran a gran velocidad, por lo que producen una fuerte radiación. El sistema perdía energía, cambiaba su frecuencia y se acercaba a la Tierra de acuerdo con las previsiones de las ecuaciones de Einstein, Taylor y Rusell. Este descubrimiento fue merecedor del Premio Nobel.

Una vez más se ha producido la antelación entre la concepción matemática de un fenómeno y su descubrimiento físico, como le sucedió a Maxwell, quien con sus 4 célebres ecuaciones describió por completo los fenómenos electromagnéticos introduciendo los conceptos y unificando los campos eléctricos y magnéticos en un solo concepto, el del campo electromagnético origen de las comunicaciones radio y de los sensores electromagnéticos, utilizando las experiencias de Coulomb, Gauss y Ampere. Es decir que Maxwell a través de

sus ecuaciones intuyó la posibilidad de las radiocomunicaciones y de los sensores electromagnéticos como el radar. Sus ecuaciones constituyeron el fundamento de las ondas electromagnéticas, por las que un campo eléctrico crea un campo magnético que a su vez vuelve a crear a otro campo eléctrico en posición más avanzada y trasladada a la velocidad de la luz, y así sucesivamente. Las variaciones en la intensidad de estos campos producen la información a distancia.

Las ecuaciones de Maxwell demostraron que la electricidad, el magnetismo y la luz son manifestaciones del mismo fenómeno, el electromagnetismo, convirtiendo a todas las otras leyes y ecuaciones clásicas de estas disciplinas en casos simplificados de las ecuaciones que también fueron la base del descubrimiento de dos importantes propiedades de la luz: que se compone de ondas electromagnéticas y que su velocidad de propagación no depende de la velocidad del emisor.

Una vez encontrada la respuesta a la primera parte del enunciado de este artículo, pasamos a comentar la segunda.

En el momento actual no existe una aplicación directa de las ondas gravitacionales dada su debilidad. Mundialmente se está investigando con gran intensidad por lo que se intuye que en el futuro el hombre podrá crearlas y utilizarlas, con lo que dispondrá de un sistema análogo al de las ondas electromagnéticas, con la ventaja sobre ellas de no ser detectadas por los sistemas de guerra electrónica.

La detección de las ondas gravitacionales ha confirmado la teoría de la Relatividad y ha confirmado la existencia del E/T de Minkowski, por el cual en el Universo además del espacio tridimensional existe el tiempo interrelacionado con dicho espacio, lo que conforma el espacio de cuatro dimensiones que es uno de los avances más importantes de la Física en el siglo XX.

Pero lo más importante de la detección de las ondas gravitacionales, además de confirmar la Teoría de la Relatividad, es que estas ondas proporcionan la posibilidad de examinar el Universo con ondas distintas a las electromagnéticas, que también permitirán comprobar la existencia de cuerpos masivos como agujeros negros, pulsares y otros.

También se pueden generar estas ondas por el paso de un rayo de luz por las cercanías de una masa pequeña que se mueva aceleradamente, y es en estos casos en los que se puede obtener aplicación al campo militar. Por ello, y con independencia de los avances citados existe la posibilidad de que estas ondas sustituyan o amplifiquen a las electromagnéticas tanto en los sensores como en los sistemas de comunicación. En esto radica la importancia que le damos, puesto que la adopción generalizada de estas ondas supondrá una transformación en las operaciones militares, especialmente en las de cometido aeronaval.

Actualmente se han conseguido buques de guerra y aviones de combate y de exploración que no dan eco a los sensores, así por ejemplo los nuevos

destructores norteamericanos de la clase *Zumwalt* y distintos aviones y drones no dan eco radar porque sus superestructuras son planchas planas e inclinadas de modo que desvía los impulsos electromagnéticos en una dirección distinta a la incidente, ya que como sabemos, y al igual que sucede en el campo óptico, el ángulo de incidencia del rayo óptico es igual al ángulo de reflexión desviándolo de la línea blanco-radar y quedando sin efecto, como se ha indicado anteriormente las medidas de la guerra electrónica.

De momento no existe ninguna aplicación concreta derivada de la existencia de las ondas gravitacionales, y todas las investigaciones van encaminadas a conseguir su detección de un modo permanente y con mayor intensidad en su propio ámbito, así como su creación. Para ello se está potenciando la investigación sobre estas ondas lo que abre un nuevo horizonte tecnológico de primera magnitud. Su detección es uno de los mayores retos de la física experimental y se basa en observar cambios extremadamente pequeños.

## **Conclusión**

La detección de las ondas gravitacionales abre un camino de investigación del Universo y su posible desarrollo permite vislumbrar su empleo en el campo de las comunicaciones y de los sensores, de gran aplicación militar, ante la posible sustitución del espectro electromagnético.