

ONDAS GRAVITACIONALES: EL “SONIDO” DEL UNIVERSO

José Manuel Carmona¹

Departamento de Física Teórica, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza (Spain)

Este ensayo fue galardonado en el VII Concurso de Divulgación del CPAN (Centro Nacional de Física de Partículas, Astropartículas, y Nuclear), www.i-cpan.es

Hace mil trescientos millones de años, en una galaxia muy, muy lejana, sucedió un hecho asombroso. Un cataclismo de proporciones difíciles de imaginar, cuyo registro ha supuesto una proeza científica y tecnológica extraordinaria. Para ilustrar lo que pasó, pensemos por un momento en algo relativamente familiar: el Sol.

Nuestra estrella contiene nada menos que el 99,8% de la masa de todo el sistema solar, pero también es muy grande: alrededor de un millón trescientas mil “planetas Tierra” cabrían en su interior. Pues bien: tomemos no uno, sino 29 soles, y comprimamos toda esa cantidad de materia hasta ocupar una región de unos 150 km de diámetro, algo así como el área metropolitana de Madrid o Barcelona. Esa enorme concentración de materia origina un agujero negro. Ahora imaginemos a semejante objeto moviéndose a la mitad de la velocidad de la luz. Cojamos otra mole aún mayor, de 36 masas solares y tamaño parecido, y también a esa velocidad. Finalmente, hagamos chocar esos dos monstruos, originando así uno de los eventos más extremos que puede haber en el Universo. Este fue el hecho que, como decimos, ocurrió en un tiempo y lugar remotos.

En dicho suceso, los dos agujeros negros de 36 y 29 masas solares se fusionaron en un nuevo agujero negro de 62 masas solares (en vez de 65, la suma de 36 y 29). Eso significa que 3 masas solares fueron aniquiladas, transformadas en energía pura, según la famosa ecuación de Einstein $E = Mc^2$. Para que nos hagamos una idea, en una bomba atómica, unos pocos gramos o kilos de uranio son convertidos en una cantidad enorme de energía. La producida durante la fracción de segundo que duró la colisión de los agujeros negros fue el equivalente a diez mil billones de trillones (un 1 con 34 ceros detrás) de bombas de Hiroshima. ¡La potencia emitida (energía por unidad de tiempo) superó así a la de todas las estrellas del universo observable juntas!

Curiosamente, si nos hubiéramos encontrado más o menos cerca de allí, no hubiéramos oído el ruido de una explosión, puesto que en el espacio exterior no hay aire que pueda transportar el sonido; tampoco hubiéramos visto ningún fogonazo de luz, puesto que los agujeros negros tienen la característica de que nada, ni siquiera la luz, puede salir de ellos. Lo que la tremenda energía de esa colisión provocó fue una deformación en la misma estructura del espacio y del tiempo, que fue extendiéndose alrededor del agujero negro recién formado, propagándose como una onda.

Allí mismo, esa distorsión fue sin duda brutal, creando una especie de huracán que curvó el espacio, estirándolo y encogiéndolo en distintas direcciones, y acelerando y decelerando el tiempo exageradamente; algo a lo que, sin duda, no habríamos sobrevivido. Pero todo ello ocurrió en una galaxia muy lejana, a mil trescientos millones de años luz. Eso significa que esa onda de espacio-tiempo, esa onda gravitacional, estuvo viajando hasta nosotros durante mil trescientos millones de años, extendiéndose en esferas cada vez más grandes desde la fuente y, por tanto, más debilitada.

Un buen día, el 14 de septiembre de 2015, a las 09.50 hora UTC (las 11.50 horas en España en ese momento), esa onda alcanzó la Tierra. No obstante, su capacidad para alterar el espacio-tiempo era ya realmente pequeña. Muy pequeña. La onda hizo vibrar varias veces, y durante apenas unas centésimas de segundo, el brazo de 4 km del detector LIGO, en EEUU, modificando su longitud en... ¡una cantidad mil veces menor que el tamaño de un protón! Ese cambio tan inconcebiblemente minúsculo es lo que los científicos de LIGO pudieron medir, obteniendo información sobre el suceso astrofísico anteriormente descrito.

¹ E-mail: jcarmona@unizar.es

Semejante hazaña fue anunciada por la colaboración LIGO el 11 de febrero de 2016, en una rueda de prensa seguida en directo a través de Internet por miles de científicos y aficionados a la ciencia, que la escucharon conteniendo el aliento y frotándose los ojos sin terminar de creerse que la detección de ondas gravitacionales, predichas por Albert Einstein exactamente cien años atrás, fuese por fin una realidad. Los diversos artículos con detallados análisis que la colaboración hizo públicos ese mismo día, sin embargo, no dejaban lugar a dudas. La repercusión en los medios de comunicación fue inmediata. Una vez más, remarcaron, Einstein tenía razón.

Por eso resulta curioso que el propio Einstein, habiendo deducido matemáticamente la propagación de ondas gravitacionales a partir de su teoría de la relatividad general en 1916, creyese demostrar posteriormente que no tenían existencia real en un artículo titulado “*¿Existen las ondas gravitacionales?*”, que, junto a su colaborador Nathan Rosen, envió a la revista *Physical Review* en 1936. Sin embargo, el editor de dicha revista devolvió el artículo a sus autores para que lo corrigiesen tras recibir un informe negativo del especialista al que lo había mandado para su inspección. La revisión por pares es una práctica habitual hoy en día como garantía de calidad de las publicaciones científicas, pero en aquel entonces la revista americana comenzaba a ponerla en práctica, y Einstein jamás se había visto sometido a ella. Enfadado con el editor, retiró el artículo sin contestar a los comentarios del experto anónimo que lo había examinado. Lo acabaría publicando en una revista hoy mucho menos prestigiosa, la *Journal Franklin Institute*, pero con un título (“*Acerca de las ondas gravitacionales*”) y unas conclusiones muy diferentes a los del trabajo original, pues para entonces Einstein se había convencido de que, en efecto, había cometido un error y las ondas gravitatorias existían realmente. En su cambio de actitud parece que influyeron conversaciones con un conocido físico relativista americano, Howard P. Robertson, que hoy sabemos, gracias a los archivos de la *Physical Review*, era el anónimo revisor que había evaluado aquel primer artículo.

Las dudas de Einstein no eran injustificadas. La relatividad general es una teoría complicada, en la que la libertad de elección de coordenadas (su principal característica) puede llevar a identificar como efecto real algo que no lo es y que desaparece al tomar las coordenadas adecuadas. En la actualidad, sin embargo, la comunidad internacional tenía ya pruebas firmes, aunque indirectas, acerca de la realidad de las ondas gravitacionales.

En 1974 se descubrió el primer púlsar binario, un objeto astrofísico formado por dos estrellas de neutrones que orbitan entre sí y que, según la relatividad general, debería perder energía al emitir ondas gravitacionales. La alteración de la órbita debido a esta emisión fue medida experimentalmente en los años siguientes², observándose que la separación entre ambas estrellas disminuye unos dos centímetros al día (terminarán colisionando en unos 300 millones de años)³. Estos resultados están de acuerdo con las predicciones de la relatividad general, y constituyen una demostración indirecta de la existencia de ondas gravitacionales.

LIGO (iniciales en inglés de *Observatorio de ondas Gravitacionales por Interferometría Láser*) ha sido capaz, sin embargo, de obtener una prueba *directa* de las ondas gravitacionales. Para ello ha medido los cambios que se producen en la distancia entre dos espejos que se hallan suspendidos como péndulos, separados una distancia de 4 kilómetros que se mantiene de modo muy preciso utilizando todo tipo de mecanismos para disminuir las vibraciones sísmicas, térmicas o electrónicas. Dichas vibraciones producen un ruido de fondo en la monitorización de la distancia entre los espejos, que se lleva a cabo mediante lo que se denomina un *interferómetro*.

En este interferómetro, dos haces de luz láser son enviados a través de sendos túneles colocados perpendicularmente, en cuyo interior se ha hecho un vacío máximo para que nada perturbe su recorrido. Ambos brazos, de 4 km de longitud, poseen en sus extremos espejos exquisitamente tallados entre los que el

² Un púlsar emite radiación que podemos detectar desde la Tierra y de la que podemos inferir propiedades orbitales, por ejemplo.

³ La disminución de distancia debida a emisión de ondas gravitacionales también se produce en el sistema Tierra-Sol, pero no es nada preocupante. La pérdida de energía es de unos 200 vatios (menos de lo que consume una tostadora), frente a los 10^{25} vatios que se emiten en el púlsar binario indicado.

láser rebota varias veces. Finalmente, los dos haces de luz son juntados y proyectados en una pantalla. Cuando ambos rayos han recorrido exactamente la misma distancia, los 4 km, el resultado de combinarlos produce oscuridad en la pantalla (los dos haces de luz interfieren *deconstructivamente*). Si existe una pequeña diferencia en la longitud recorrida, como la que produciría el paso de una onda gravitacional, ambos haces dejan de estar “sincronizados” y se recoge luz en la pantalla. La cantidad de luz puede ser muy pequeña, pero es una medida directa de esa diferencia y, gracias a que la longitud de onda de la luz utilizada es del orden del micrómetro y el láser es muy intenso (lo que significa que el número de fotones recogidos en la pantalla es grande aun con una minúscula desincronización en los haces), el experimento posee esa sensibilidad tan increíble.

Ahora bien, ¿cómo distinguir las variaciones producidas por una onda gravitacional, del ruido de fondo, que, como hemos comentado, es constante y producido por otras causas? Aquí está el mayor de los trucos: en realidad existen *dos* detectores LIGO, en el norte y sur de Estados Unidos, separados unos tres mil kilómetros. Una onda gravitacional, que, según la relatividad general, se desplaza a la velocidad de la luz en el vacío, tarda unos diez milisegundos en viajar entre ambas sedes. Esto quiere decir que la señal producida por la onda, camuflada sobre un ruido aleatorio, resaltarán al comparar los datos de ambas sedes de LIGO, tomados con una diferencia de tiempo de unos pocos milisegundos.

La forma precisa de la señal, una oscilación en la intensidad de la luz recogida resultado de la vibración producida en los brazos de LIGO, revela las propiedades de la onda gravitacional y del suceso astrofísico que la originó. Hemos descubierto así, no solo que la relatividad general es correcta en un grado de precisión muy alto y que las ondas gravitacionales existen y podemos detectarlas, sino también que la Naturaleza produce sistemas binarios de agujeros negros con masas decenas de veces la del Sol, y que esos agujeros negros llegan a fusionarse a lo largo de la evolución del Universo. Al igual que las ondas sonoras producidas por un instrumento musical estimulan nuestros oídos, las ondas gravitacionales de esa fusión han excitado el interferómetro de LIGO. No hemos “visto” un agujero negro, pero, siguiendo la analogía anterior, podríamos decir que lo hemos “oído”.

La detección de septiembre de 2015 es solo el comienzo de una nueva rama de la física, la astronomía de ondas gravitacionales, cuyas aplicaciones prácticas futuras pueden ser difíciles de predecir⁴, pero que en breve revolucionará la forma en la que observamos el Universo⁵. Con ella, hablando figuradamente, nos ha nacido un nuevo sentido para explorar el cosmos.

Hasta la fecha, disponíamos esencialmente de dos formas de percibir el Universo. La primera es mediante el sentido de la “vista”: nuestros telescopios, tanto ópticos, como de radio o de rayos X, recogen ondas electromagnéticas, fotones que actúan como mensajeros de las fuentes que los producen y de todo aquello que afecta a su propagación en su camino hasta nosotros.

La segunda es mediante instrumentos que utilizan grandes extensiones de hielo polar o de mar para detectar los escurridizos neutrinos, partículas que son producidas en cantidades ingentes en multitud de procesos astrofísicos, pero que apenas interactúan, resultando así tan tenues como, quizá, una fragancia. Este sentido del “olfato” permite estudiar, por ejemplo, el interior del Sol o el estallido de una supernova.

Con la detección de ondas gravitacionales tenemos la capacidad de “escuchar” lo que podríamos llamar el “sonido” del Universo. LIGO y otros detectores que en breve se sumarán a él constituyendo una red mundial de observatorios de ondas gravitacionales, serán los “oídos” que nos traerán los ecos de agujeros negros o estrellas de neutrones, pero también de otros objetos más exóticos. Objetos hoy desconocidos que, aunque,

⁴ En realidad, una importante empresa petrolera ya está ensayando la utilización en prospecciones de un detector sísmico diseñado para su uso en detectores de ondas gravitacionales. Toda investigación básica acaba produciendo aplicaciones prácticas, y más aún en casos como el de este campo, que precisa de la tecnología más vanguardista en disciplinas tan variadas como la sismología, la ingeniería del vacío, la ingeniería de sistemas de control o la óptica cuántica, entre otras.

⁵ De hecho, la colaboración LIGO ha confirmado recientemente una segunda detección ocurrida el pasado 25 de diciembre. La fusión de agujeros negros en el Universo es un hecho más frecuente de lo que imaginábamos.

como los agujeros negros, no emitan luz ni neutrinos, sí serán afectados como ellos por la única interacción verdaderamente universal: la gravedad, que conecta el propio espacio-tiempo con la masa y energía de los cuerpos que habitan en él. Cada uno de estos objetos sonará con un patrón característico en la onda gravitacional recibida, y el análisis cuidadoso de esta señal nos permitirá comprender sus propiedades.

¿Qué nuevos sonidos escucharán estos oídos? ¿Qué nuevos hallazgos nos revelarán, que todavía no alcanzamos ni a imaginar?