Este artículo aparecerá publicado en el Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid para el año 2019.

Las ondas gravitacionales, mensajeras de un universo oculto

Rafael Bachiller

Astrónomo y director del Observatorio Astronómico Nacional
Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento

Resumen

La reciente detección de ondas gravitacionales por parte de la colaboración LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) supone la confirmación de una de las predicciones más sorprendentes de la teoria de la Relatividad General de Einstein, y proporciona a la astronomía una nueva herramienta para explorar el universo. Esta detección ha sido el producto de décadas de trabajo y desarrollos tecnológicos, y es considerada ya como uno de los resultados científicos más importantes de este siglo. Prueba de ello es la concesión del Premio Nobel de Física en 2017 a los principales responsables del experimento LIGO.

Las primeras ondas gravitacionales detectadas en la historia se originaron en la colisión de dos agujeros negros de 35 y 30 veces la masa de nuestro Sol, que tuvo lugar hace 1 400 millones de años. Su detección con LIGO el 14 de septiembre de 2015 marca el comienzo de una nueva época en la exploración del universo. En este artículo recorremos la apasionante historia de este hallazgo y de los que le siguieron, de su significado científico y de su impacto en el conocimiento humano.

La Relatividad General de Einstein

Para comprender el significado físico de las ondas gravitacionales hay que remontarse más de un siglo, concretamente al año 1915, momento

de la publicación de la teoría de la Relatividad General, sin duda una de las construcciones más bellas y abstractas producidas por la humanidad, una auténtica obra de arte científica que fue pergeñada por la mente de una persona de 36 años de edad, un hombre que, refugiándose de las múltiples condiciones adversas que le rodeaban, trabajaba en solitario: Albert Einstein.

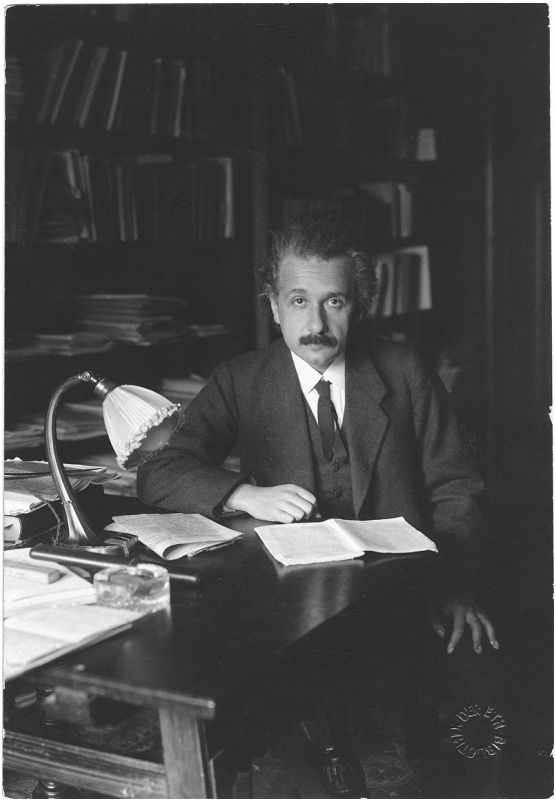

Figura 1: Einstein en su oficina en Berlín, hacia 1920.

En noviembre de 1915, Einstein se encontraba en Berlín y era víctima de varias guerras. La primera, la mundial, había penetrado en los despachos del instituto dirigido por el químico Fritz Haber en donde trabajaba Einstein. Los tres científicos que le habían atraído a Berlín –Max Planck, Walther Nernst y el propio Haber– consternaban a Einstein con su actitud belicista y su colaboracionismo con el ejército. En concreto, Haber, quien había encontrado ya su célebre método para sintetizar el amoníaco, lo que

permitía la fabricación masiva de explosivos, se encontraba reorganizando el instituto para dedicarlo a la fabricación de armas químicas para el ejército alemán. La irracionalidad de esta guerra llevó a Einstein a defender unos ideales sociales y políticos de talante internacionalista y pacifista que mantuvo y acentuó durante el resto de su vida. La segunda guerra la estaba librando Einstein en un plano personal: su separación de Mileva Maric, con dos hijos por medio, era una fuente interminable de amargas desavenencias.

Einstein se refugiaba en el trabajo, pero también libraba una guerra en este plano pues mantenía una frenética competición con David Hilbert, el gran matemático de Gotinga que igualmente se encontraba trabajando, aunque desde un punto de vista puramente matemático, en la deducción de unas ecuaciones para la relatividad general. Según refiere Walter Isaacson, en su excelente biografía de Einstein, éste escribió en una carta a su hijo Hans Albert, el 4 de noviembre: "A menudo estoy tan enfrascado en mi trabajo que me olvido hasta de comer". Se encontraba además "agotado y agobiado" por dolores de estómago que no le permitían ir a Gotinga para debatir con Hilbert en persona.

Aún en este estado, Einstein fue capaz de concentrarse en el estudio de los tensores (unos objetos matemáticos similares a las matrices) y de la geometría no-euclídea de cuatro dimensiones, las herramientas que debían permitirle generalizar la teoría de la relatividad que, en una formulación restringida, había enunciado en 1905. Einstein se había comprometido previamente a dar una serie de cuatro conferencias al medio centenar de miembros de la Academia Prusiana en los jueves de noviembre. Y, mientras polemizaba epistolarmente con Hilbert, esa serie de conferencias constituyó el estímulo definitivo que le llevó a culminar su teoría.

En la primera de esas conferencias, impartida el día 4, rememoró las numerosas dificultades con que llevaba luchando durante los últimos años para encontrar las ecuaciones que debían regir el comportamiento del campo gravitatorio y puso de manifiesto que las que estaba considerando entonces no eran aún completamente satisfactorias; sabemos hoy que aún le faltaban tres semanas para lograrlo. En la segunda conferencia, presentó unas ecuaciones revisadas que no eran substancialmente mejores. En la tercera de las conferencias, el día 18, anunció que sus ecuaciones en el último formato eran capaces de explicar el movimiento de Mercurio (que no podía explicarse con la teoría tradicional de Newton) con total precisión y anunció un nuevo valor para la curvatura que debía sufrir un rayo de luz a su paso por la vecindad solar. El jueves siguiente, el día 25, fue cuando pronunció su famosa y apoteósica conferencia titulada "Las ecuaciones de campo de la gravitación" en la que presentó el conjunto de ecuaciones que culminaban la teoría de la Relatividad General.

Estas diez ecuaciones, conocidas hoy como "ecuaciones de Einstein", se expresan de una manera sorprendentemente compacta y elegante: $G = 8\pi T$. Es una manera concisa de decir que la geometría del espacio-tiempo

(representada por G) está determinada por los movimientos de los objetos materiales que se encuentran en su seno (representados por T) y, viceversa, que los movimientos de tales objetos están determinados por la curvatura del espacio-tiempo. De acuerdo con estas ecuaciones, espacio, tiempo, materia y energía forman un intricado entramado en el que cada uno de estos elementos tiene un efecto sobre los otros. Este mundo físico es muy diferente pues, a aquel de Newton en el que espacio y tiempo eran unos marcos absolutos inalterables en cuyo seno tienen lugar los movimientos de los cuerpos materiales. Muy al contrario, en el universo de Einstein, una masa situada en una zona del espacio hace que, en su entorno, el tiempo transcurra más lentamente y que el espacio se deforme y, a su vez, esta deformación determina el movimiento de otros objetos próximos.

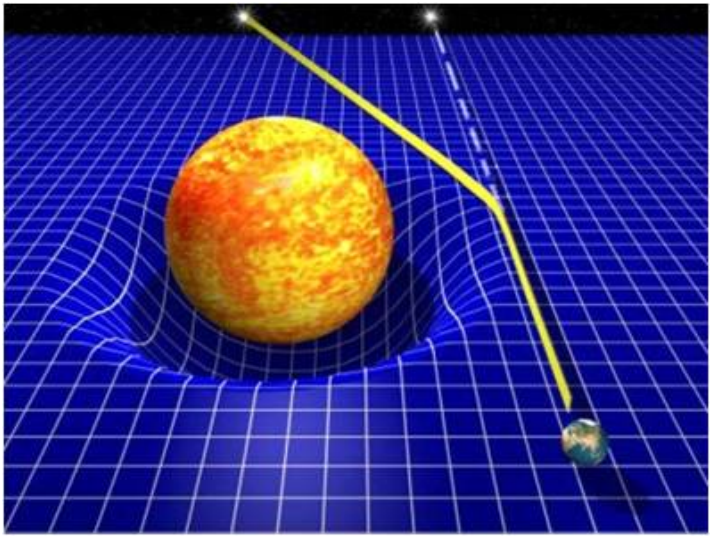

Figura 2: El efecto de una masa sobre la trayectoria de un rayo de luz.

Tal y como anunció en sus célebres conferencias de 1915, la propagación de la luz debía verse influida por la gravitación, lo que permitiría realizar comprobaciones experimentales. Por ejemplo, un rayo de luz que pase junto al Sol debía desviarse por 1,74 segundos de arco. El astrónomo británico Sir Arthur Eddington propuso entonces que una ocasión para medir la curvatura de la luz la brindaría el eclipse total de Sol del 29 de mayo de 1919. En efecto, durante un eclipse solar es posible observar estrellas brillantes en el entorno del astro rey. Si el Sol es capaz de desviar la trayectoria de los rayos de luz, algunas

de estas estrellas brillantes observadas en direcciones cercanas al Sol eclipsado deberían verse en posiciones aparentes diferentes respecto de sus posiciones habituales, medidas cuando el Sol se encuentre en una posición distante del firmamento. La Royal Society organizó dos expediciones a la zona de totalidad del eclipse, una al norte de Brasil y otra a la Isla del Príncipe, en el golfo de Guinea, para medir las posiciones estelares en la vecindad solar. Eddington comprobó así, de manera espectacular y ante una gran expectación a nivel mundial, que las pequeñísimas desviaciones de los rayos de luz predichas por la Relatividad General (1,74 segundos de arco equivalen a media milésima de grado) eran absolutamente reales.

Esta medida de la desviación de la luz venía a sumarse a la explicación precisa del movimiento de Mercurio anunciada en la tercera de las conferencias de la Academia de Prusia. Desde entonces, la teoría ha sido sometida a muchas más pruebas de las que siempre ha salido airosa. La Relatividad General resulta hoy imprescindible para calcular las distancias y las propiedades de los objetos más lejanos del universo y, de hecho, es en las condiciones de gravitación extrema, como las que se dan en las proximidades de los agujeros negros, donde la Relatividad General produce sus efectos más espectaculares.

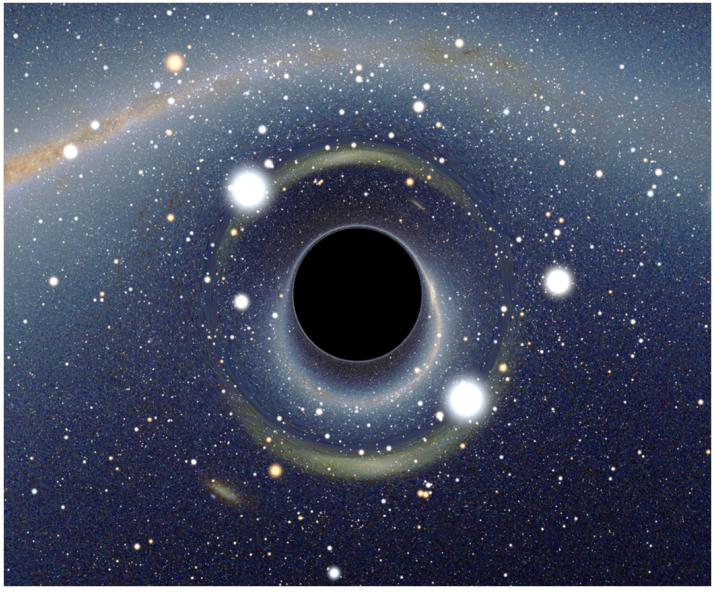

Figura 3: Recreación de un agujero negro.

Conviene destacar, sin embargo, que la Relatividad General no solo trata de elucubraciones teóricas y de descripciones de situaciones astrofísicas

extremas. Como es el caso para otras teorías, la Relatividad General es un resultado de la ciencia básica que encuentra grandes aplicaciones tecnológicas en la vida cotidiana. Por ejemplo, gracias a la Relatividad General funciona una tecnología que hoy puede parecernos banal: el GPS. En efecto, al estar sometido el satélite a una fuerza gravitacional menor que la que actúa en la superficie de la Tierra, el tiempo transcurre más rápidamente en el satélite GPS que en el receptor en tierra. Este efecto se suma a otro predicho por la relatividad restringida: la dilatación del tiempo ocasionado por la alta velocidad del satélite. Y ambos efectos, cuando se tienen en cuenta, hacen posible que el sistema GPS funcione correctamente.

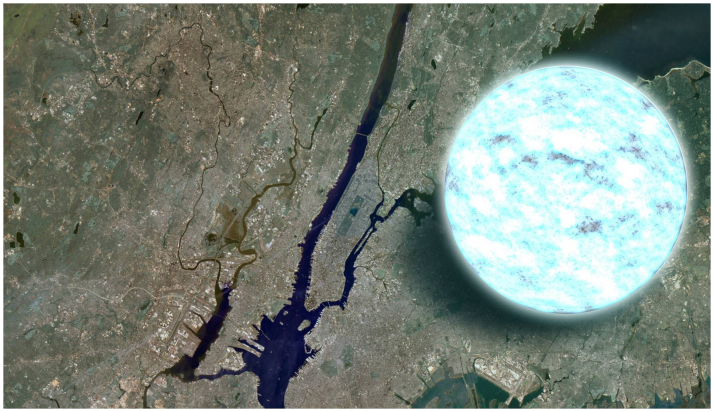

Figura 4: Una estrella de neutrones comparada con la ciudad de Nueva York.

Ondas en el espacio-tiempo

Una consecuencia teórica de la Relatividad General es que cuando las masas se mueven de manera acelerada deben producir unas ondulaciones o "arrugas" en el espacio-tiempo que son conocidas como ondas gravitacionales. Al propagarse, estas ondas comprimen el espacio en algunas zonas y lo estiran en otras. Naturalmente, tras la enunciación de la Relatividad General y la llegada de las primeras pruebas que corroboraban su validez, los físicos se pusieron inmediatamente a pensar en la manera de llegar a detectar las ondas gravitacionales. Sin embargo, se ha necesitado un siglo de trabajo para lograr su detección. Y se ha necesitado tan largo tiempo porque las fluctuaciones producidas en el espacio, por estas ondas, tienen un tamaño típico que es una milésima parte del tamaño de un protón. Para llegar a detectarlas se necesitaban, por un lado, grandes masas (como las contenidas en los agujeros negros) que se muevan y

que produzcan una buena cantidad de ondas y, además, un detector de altísima sensibilidad. Estas dos circunstancias se dieron por primera vez en el caso del experimento LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory).

Pero no es esta la primera indicación observacional de la existencia de las ondas gravitacionales. En 1993, Russell Hulse y Joseph Taylor recibieron el Nobel de Física por el descubrimiento de un pulsar binario (esto es, un par de estrellas de neutrones orbitándose mutuamente) en el que el periodo orbital se va acortando progresivamente, y este acortamiento sucede de manera completamente consistente con la pérdida de energía por ondas gravitacionales predicha por Einstein en su teoría. Es cierto que no fue una detección directa de las ondas, pero sí una prueba indirecta de enorme valor.

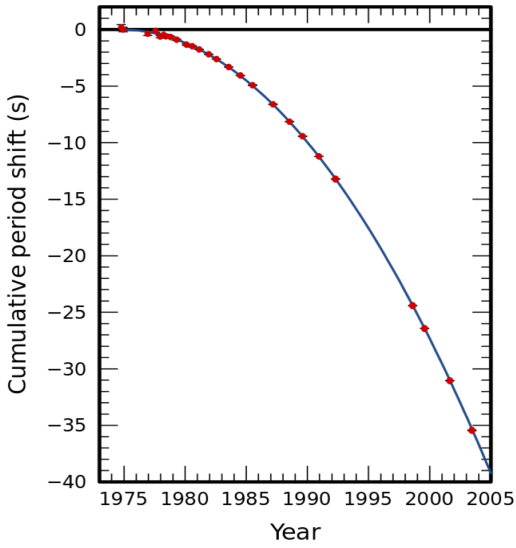

Figura 5: Variación en el tiempo del periodo del pulsar doble de Hulse y Taylor: prueba indirecta de emisión de ondas gravitacionales.

Como hemos dicho, las fluctuaciones producidas en el espacio por estas ondas son minúsculas. Para llegar a detectarlas se necesitaban, por un lado, grandes masas en movimiento, como las contenidas en un sistema binario de agujeros negros. Y además, se precisaban unos detectores de altísima sensibilidad, como el LIGO (en Estados Unidos) o el VIRGO (en Italia), sistemas de detección que funcionan por el principio de interferometría láser y que representan un auténtico alarde tecnológico en la ingeniería

óptica y mecánica. Como decíamos, son sistemas capaces de detectar distorsiones del orden de 10^{-18} metros en una longitud, la milésima parte del tamaño de un protón.

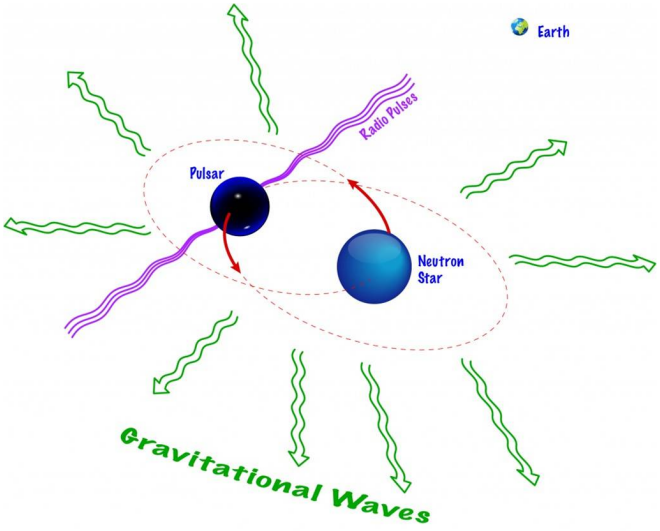

Figura 6: Esquema de la generación de ondas gravitacionales en un par de estrellas de neutrones.

El observatorio y la colaboración científica LIGO

En el observatorio LIGO que, como ya hemos señalado incluye un interferómetro láser, un rayo estrecho de luz láser es dividido y enviado en diferentes direcciones donde los haces luminosos se encuentran con espejos. Tras reflejarse en ellos, los haces de luz son recogidos en un detector. Si una onda gravitacional alcanza el interferómetro, la distancia entre espejos varía ligerísimamente y esta variación se traduce en una leve diferencia de fase entre los haces de luz recogidos por el detector. Estas ondas son tan débiles que cualquier otro fenómeno en las proximidades del interferómetro puede causar "ruido" que las enmascara. Para mejorar la sensibilidad en el proceso de detección, LIGO hace que sus haces de luz recorran 4 kilómetros en cada brazo del interferómetro, los detectores están suspendidos en el aire para evitar todas las vibraciones de la superficie terrestre y, finalmente, el interferómetro se construyó por duplicado, con una antena en Hanford, en el estado de Washington, y otra en Livingston, en el estado de Luisiana, separadas por 3 000 kilómetros, de forma que una vez

que llegase una onda extraterrestre pudiese detectarse simultáneamente en los dos lugares, y no quedase la duda de que la detección pudiese ser debida a un fenómeno local. Todo sumado, un espectacular alarde tecnológico.

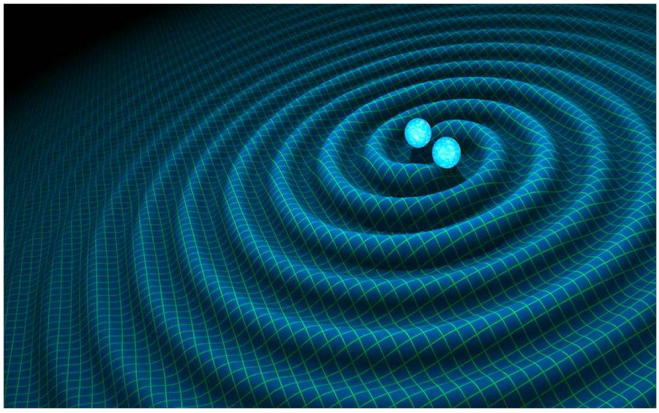

Figura 7: Recreación de la generación de ondas gravitacionales en un par de objetos compactos.

La Colaboración Científica LIGO (LSC, por sus siglas en inglés) es un grupo de 1 167 científicos del campo de la física de más de un centenar de universidades e instituciones de dieciocho países, cuya misión principal es la detección directa de ondas gravitacionales con el objetivo de emplearlas en la exploración de las leyes fundamentales de la gravedad, así como la investigación, desarrollo y perfeccionamiento de las técnicas para la detección y la puesta en marcha y uso de los detectores de ondas gravitacionales. La LSC desarrolla la investigación de LIGO que, como hemos señalado, es el mayor observatorio de ondas gravitacionales y uno de los experimentos físicos más sofisticados del mundo.

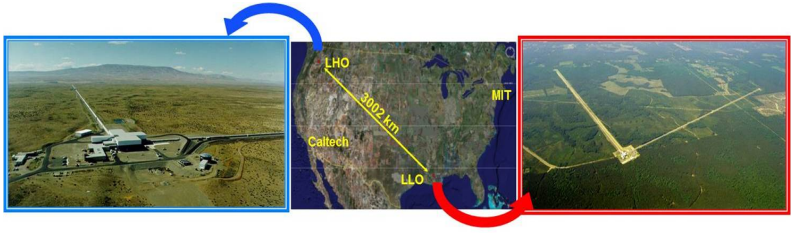

Figura 8: Los dos observatorios LIGO, en Hanford y Livingston | LIGO.

LIGO tiene sus orígenes en los años ochenta y su financiación inicial fue aprobada en 1992, lo que supuso la mayor inversión que la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos había hecho jamás. Está operado por el LIGO Laboratory, un consorcio del Instituto Tecnológico de California (Caltech) y el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) y constituye un recurso internacional para físicos y astrofísicos de todo el mundo. En los años 2000, este conjunto de detectores se complementó con TAMA300 en Japón, GEO600 en Alemania y la Colaboración Virgo en Italia. En 2002, haciendo uso de las combinaciones de estos detectores, se hicieron las primeras observaciones conjuntas, que finalizaron en 2010 sin ninguna detección, aunque los datos recabados sirvieron para un rediseño completo de los instrumentos e infraestructuras. Estas mejoras se estuvieron realizando hasta 2014, cuando el denominado Advanced LIGO comenzó a funcionar con un aumento significativo de la sensibilidad y del volumen del universo a explorar.

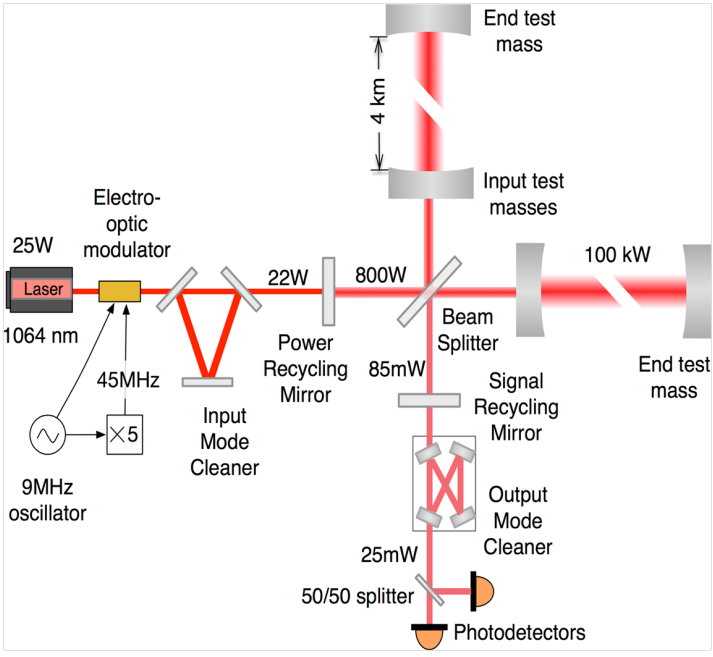

Figura 9: Esquema del interferómetro de Michelson que conforma cada observatorio LIGO | LIGO.

La LSC se financia a través de recursos públicos y privados procedentes de instituciones como la Fundación Nacional de Ciencias de Estados

Unidos, el Science and Technology Facilities Council de Reino Unido, la Sociedad Max Planck y el Estado de Baja Sajonia (Alemania), además de otros organismos de Australia, India, Italia, España, Hungría, Corea, Canadá, Brasil, Rusia, Taiwán y Estados Unidos.

Las detecciones

El 14 de septiembre del año 2015, una débil señal llegó a ambos detectores de LIGO con una diferencia de 7 milisegundos. Tras todas las comprobaciones de rigor, se realizaron simulaciones numéricas con superordenadores que mostraban que esta señal se explicaba perfectamente mediante la fusión de dos agujeros negros de masas en rangos estelares. Concretamente, el modelo que mejor explica las observaciones es el de dos agujeros negros de 30 y 35 masas solares que colisionan para formar uno de 62 masas solares, emitiendo al espacio, en forma de ondas gravitacionales, una energía equivalente a tres veces la contenida en el Sol. Como la colisión tiene lugar en 20 milisegundos, resulta que, durante ese cortísimo periodo de tiempo, la potencia (energía por unidad de tiempo) emitida en el proceso es mayor que la suma de la potencia de todas las estrellas del universo conocido. Así pues, el experimento no sólo corrobora la teoría de Einstein mediante la detección de las ondas gravitacionales, sino que ofrece una nueva prueba de la existencia de los agujeros negros y de la posibilidad de la fusión entre ellos para formar otros más masivos.

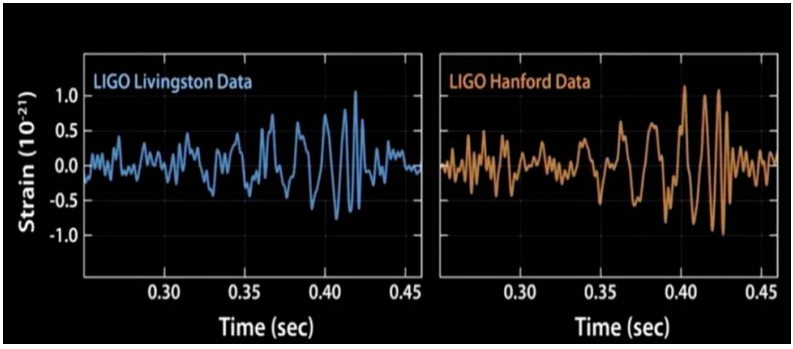

Figura 10: La detección con los dos observatorios LIGO del evento GW150914 | LIGO.

Tras esta primera detección, del 14 de septiembre de 2015, LIGO detectó otros *cuatro* episodios debidos a la fusión de dos agujeros negros con masas del orden de unas cuantas unidades o decenas de masas solares. El 15 de junio de 2016, se anunció la identificación de un segundo evento

de ondas gravitacionales, llamado GW151226, que se había detectado el 26 de diciembre del 2015 en los detectores de Livingston y Hanford. La señal fue detectada en Livingston 1,1 milisegundo antes que en Hanford, lo que permitió calcular la fuente de la señal a 1 400 millones de años luz de distancia. El 1 de junio de 2017 la LSC anunció una nueva detección de ondas gravitacionales, llamada GW170104, procedentes también del choque de dos agujeros negros, que se había producido el 4 de enero anterior. La siguiente detección de ondas gravitacionales corresponde al evento GW170608, de 8 de junio de 2017. Fue debida a la fusión de dos agujeros negros de 12 y 7 masas solares, que representan los valores más pequeños de masa observados hasta la fecha. Finalmente, el evento GW170814, de 14 de agosto de 2017, correspondió a la fusión de dos agujeros negros de 30 y 25 masas solares, y fue la primera detección conjunta de los instrumentos LIGO y VIRGO. Todos estos descubrimientos fueron hechos públicos en la prestigiosa revista Physical Review Letters.

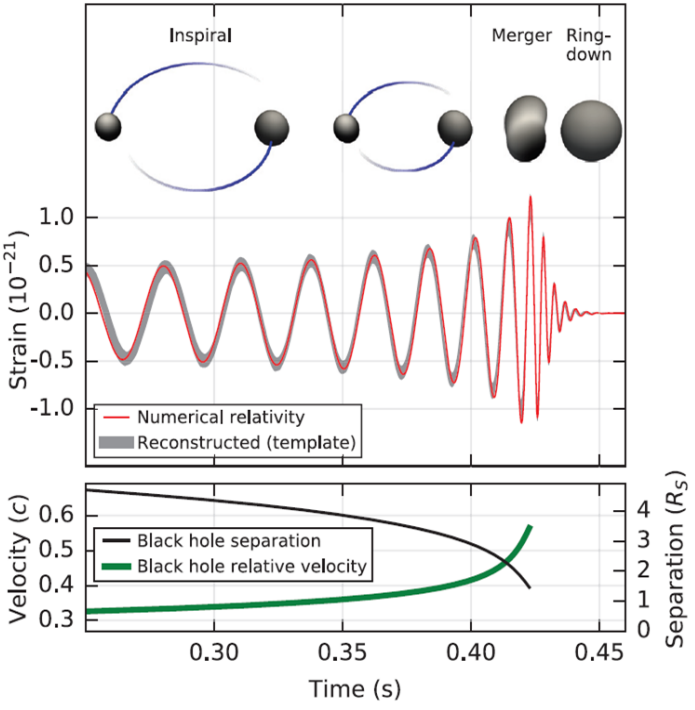

Figura 11: El modelo teórico que explica el evento GW150914 | LIGO.

Pero la comunidad astrofísica se revolucionó, quizás más aún, el 17 de agosto de 2017, cuando tanto LIGO como VIRGO detectaron un nuevo episodio de ondas gravitacionales: el evento denominado GW170817. La detección fue comunicada inmediatamente a todos los observatorios del mundo. Tan solo dos segundos tras la detección gravitacional, un brote de rayos gamma fue detectado con los telescopios espaciales Fermi (NASA) e INTEGRAL (ESA) en una región en torno la galaxia elíptica NGC4993. Esta galaxia, que se encuentra a 130 millones de años luz de distancia, en la constelación de La Hidra, se conoce desde el siglo XVIII: fue catalogada como una nebulosa, en 1789, por el gran astrónomo William Herschel.

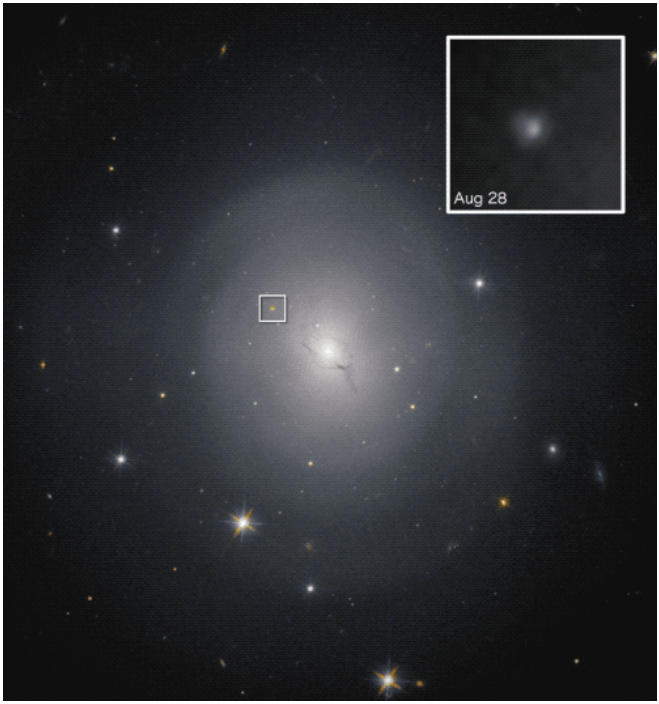

Figura 12: La galaxia NGC4993 y, en el recuadro el evento kilonova GW170817 | NASA/ESA/HST.

En la mayor campaña coordinada de observación de la historia de la astronomía, un gran número de telescopios terrestres y espaciales –entre los que se encontraban casi todos los mayores– apuntaron hacia esa zona del cielo. No se trataba de una búsqueda fácil, pues el área a explorar era unas 150 veces más extensa que la luna llena y se encontraba

relativamente próxima al Sol, por lo que sólo era posible observarla en el óptico durante una hora tras el crepúsculo. Pero a pesar de ello, 11 horas después y en un intervalo de tan solo 90 minutos, media docena de telescopios de gran campo habían identificado la aparición de una nueva fuente luminosa en NGC4993 y, a continuación, los telescopios mayores del mundo (tanto desde tierra como desde el espacio) comenzaron observaciones detalladísimas de ese nuevo punto de luz.

Desde agosto hasta ahora, miles de astrónomos han estado trabajando en el análisis de las masivas observaciones. La conclusión es que el evento del 17 de agosto de 2017 se produjo mediante la fusión catastrófica de dos estrellas de neutrones cuya masa conjunta era de 2,8 veces la masa del Sol.

Docenas de artículos científicos fueron publicados el pasado 16 de octubre de 2017 en las revistas más prestigiosas del mundo (Nature, Science, The Astrophysical Jounal, Physical Review Letters…) dando cuenta del fenómeno GW170817. En el artículo que describe las observaciones de seguimiento tras el descubrimiento participan casi 4 000 coautores de unas 900 instituciones de todo el mundo (por supuesto, varias españolas). Esto representa un tercio de la comunidad mundial de astrónomos profesionales.

Evidentemente, estas observaciones pioneras abren posibilidades completamente nuevas y están llamadas a originar una auténtica revolución astrofísica. Ahora ya es posible estudiar el comportamiento y composición de objetos sumamente masivos y compactos como las estrellas de neutrones, que concentran una masa mayor que la del Sol en una esfera de diámetro comparable al tamaño de una gran ciudad. Las ondas gravitacionales nos proporcionan una nueva herramienta para observar fenómenos que no eran observables previamente, nos abren una nueva ventana al universo.

La génesis del oro y de otros elementos pesados

Sabemos que el hidrógeno y el helio se formaron hace 13 800 millones de años, en el mismísimo Big Bang. Las primeras estrellas, constituidas exclusivamente por estos dos elementos, mediante las reacciones de fusión nuclear en sus interiores, fueron formando elementos más pesados como el carbono y el oxígeno. Pero por este proceso, tan solo se pueden formar los elementos hasta el hierro. Para formar otros elementos más pesados, como el oro y el platino, se precisa de un ámbito en el que núcleos más ligeros sean bombardeados por neutrones libres. Los astrónomos llevan décadas investigando en qué condiciones astrofísicas puede tener lugar un proceso de este tipo.

Cuando dos estrellas de neutrones colisionan se origina una explosión mil veces más brillante que las de las novas corrientes, de ahí que este

tipo de explosiones se hayan designado como “kilonovas”. Los gases expulsados en una kilonova a altísimas velocidades, de hasta el 30% la velocidad de la luz, poseen neutrones en gran abundancia y, por tanto, parecían lugares muy prometedores para la formación de núcleos más pesados que los del hierro. En los restos de la kilonova, los neutrones van desintegrándose convirtiéndose en protones (radiactividad beta), y estos dos tipos de partículas pueden combinarse entonces para formar núcleos atómicos que sufren el bombardeo del resto de los neutrones, llegando a formar así los elementos más masivos de la tabla periódica.

Como hemos indicado más arriba, tras la detección, el 17 de agosto de 2017, de las ondas gravitacionales procedentes de la galaxia NGC4993, se realizaron múltiples observaciones de esta galaxia con los telescopios más potentes del mundo. Las observaciones espectroscópicas realizadas con los mayores telescopios de ESO, como el Very Large Telescope equipado con el instrumento X-Shooter, revelaron la presencia de oro, platino, plomo y tierras raras en la kilonova que siguió a GW170817. Se confirmaba así la teoría de que los elementos más pesados que el hierro se gestan en la evolución del material nuclear que es eyectado al espacio tras la fusión de dos estrellas de neutrones. Se conocen 16 estrellas de neutrones binarias en la Vía Láctea y, a partir de este número, se estima que se da una colisión catastrófica de este estilo cada 50 000 años, aproximadamente. En cada colisión se crea una masa de oro tan grande como la masa de la Tierra, de donde se deduce que las colisiones entre estrellas de neutrones representan un fenómeno suficiente para crear todo el oro que observamos en el universo.

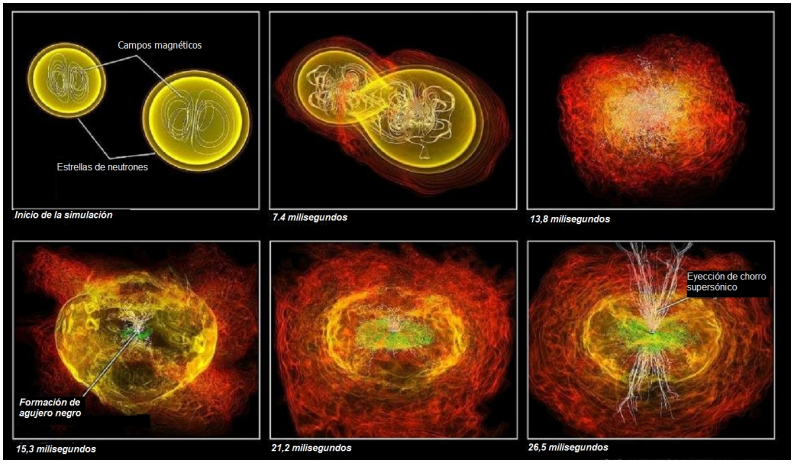

Figura 13: Simulación por ordenador de una explosión de tipo kilonova | NASA/AEI/ZIB/Koppitz and Rozzolla.

Presente y futuro de los observatorios de ondas gravitacionales

LIGO era un proyecto de alto riesgo. Comenzado en 1992, este observatorio ha supuesto una de las mayores inversiones realizadas jamás por la National Science Foundation (EE.UU.): unos 1 100 millones de dólares (aún así, esto es menos de dos milésimas del presupuesto militar norteamericano en 2015). A pesar de que sus primeras operaciones, entre 2002 y 2010, solo ofrecieron resultados negativos, la NSF atendió una nueva solicitud de los científicos para mejorar el instrumento y dotarlo de mayor sensibilidad. Una decisión que, a tenor de los resultados actuales, resultó ser muy acertada. La claridad de estas detecciones indica que, con sus prestaciones mejorando progresivamente, las nuevas versiones de LIGO serán capaces de detectar muchos más fenómenos de este estilo en un futuro próximo. Además, hay otras antenas gravitacionales empezando a funcionar en diferentes partes del mundo: GEO600 en Alemania, VIRGO en Italia, KAGRA en Japón y el propio LIGO proyecta una nueva estación en India, aprovechando el apoyo del gobierno de este país.

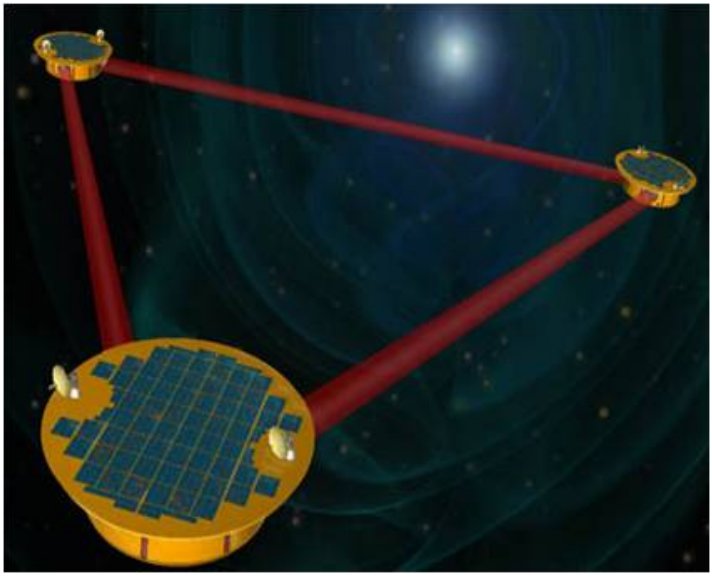

Figura 14: Ilustración del proyecto eLISA | ESA.

Finalmente, la Agencia Espacial Europea se encuentra preparando el proyecto eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna) constituido por tres naves espaciales que serían lanzadas hacia el año 2034. Se trata

de una versión espacial de LIGO en la que los brazos del interferómetro alcanzan un millón de kilómetros y en la que, obviamente, las distorsiones locales terrestres son completamente inexistentes. Hace tan solo unos meses que una pequeña misión espacial (LISA Pathfinder) ha demostrado la viabilidad de la tecnología que permite muy alta precisión en el posicionamiento de objetos suspendidos en el espacio, algo que es esencial para el interferómetro espacial. El interés de eLISA no solo reside en la mayor sensibilidad respecto de los experimentos terrestres, sino en la capacidad de detectar ondas de frecuencias mucho más bajas. Este detector debería ser capaz, por ejemplo, de detectar las ondas gravitacionales emitidas por el pulsar binario de Hulse y Taylor.

Implicaciones de la detección de ondas gravitacionales

La detección de ondas gravitacionales abre un nuevo capítulo en la observación del universo. Y es que hay fenómenos que no pueden ser estudiados mediante el análisis de la radiación electromagnética (lo que constituye la herramienta fundamental de la astronomía). Los fenómenos relacionados con los agujeros negros y algunos que sucedieron poco después del Big Bang podrán ahora ser estudiados mediante estas ondas y resulta muy difícil prever qué fenómenos nuevos van a descubrirse gracias a ellas.

Aparte del estudio del universo ¿habrá aplicaciones "realmente" prácticas? Desde luego el desarrollo de una tecnología tan exigente como la requerida por estos observatorios encontrará rápidamente aplicaciones en la vida diaria. Pero estas aplicaciones prácticas no son la única motivación de los físicos. Los físicos también estudian las ondas gravitacionales para comprender la gravitación, un ingrediente esencial de la naturaleza, para llegar a explicar y predecir el comportamiento del universo de la manera más precisa posible. El gran físico teórico Richard Feynman lo expresó con su inolvidable sentido del humor: "La física es como el sexo: por supuesto puede ofrecernos algunos resultados prácticos, pero ésta no es la razón por la que lo practicamos".

Gracias a la teoría de la Relatividad General de Einstein, contemplamos hoy el universo como un todo, un entramado en el que unas bellas ecuaciones describen la interconexión del espacio, el tiempo, la materia y la energía. Esta descripción integral del universo ha tenido una influencia decisiva en todas las teorías de la cosmología moderna que intentan explicar el origen y evolución del universo tratándolo como un ente único y completo. La teoría de Einstein es pues una genial combinación de intuición física y erudición matemática que posee unas implicaciones filosóficas de alcance asombroso. No es extraño que el propio Einstein calificase a esta teoría como "el mayor logro de mi vida".

Agradecimientos

El autor agradece calurosamente al Dr. Mario Tafalla, amigo y colega en el OAN, por una cuidadosa lectura del manuscrito que condujo a su mejora.

Bibliografía

Abbott, B. P. et al. (2016). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, Physical Review Letters, vol. 116, 061102.

Bartusiak, M. (2017). Einstein's Unfinished Symphony: The Story of a Gamble, Two Black Holes, and a New Age of Astronomy, Yale University Press.

Collins, H. (2004). Gravity's Shadow: The Search for Gravitational Waves. University of Chicago Press.

Collins, H. (2017). Gravity's Kiss: The Detection of Gravitational Waves, MIT Press.

Isaacson, W. (2008). Einstein. Su vida y su universo. Ed. Debate.

Kennefick, D. (2007). Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves. Princeton University Press.

Levin, J. (2016). Black Hole Blues and Other Songs from Outer Space. Knopf.

Sánchez Ron, J.M. (2015). Albert Einstein. Su vida, su obra y su mundo. Ed. Crítica, Drakontos.

Sintes, A.M. y Borja, S. (2017). La observación de ondas gravitacionales con LIGO. Investigación y Ciencia, febrero de 2017.

Thorne, K. S. (1994). Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy. W. W. Norton & Company.

Recursos en Internet

www.ligo.org

www.ligo.caltech.edu

www.advancedligo.mit.edu

www.nobelprize.org

Hear the chirp/the sound of two black holes colliding. https://www.youtube.com/watch?time_continue=1&v=egfBaUdnAyQ

Barish, C. B. (2017, 13 January). The Long Odyssey from Einstein to Gravitational Waves. The Royal Swedish Academy of Sciences. http://kva.screen9.tv/media/1OtpBoqgCGvsg_ifTD8kkg/the-long-odyssey-from-einstein-to-gravitational-waves

Thorne, K. S. (2016, 25 May). Disturbed Kerr Black Holes. The Royal Swedish Academy of Sciences. http://kva.screen9.tv/media/wkdjHKIXoijrB-sc0i9LKA/disturbed-kerr-black-holes

LIGO Generations. (2015). Kai Staats, https://vimeo.com/115282354

LIGO, a passion for understanding. (2014). Kai Staats, https://vimeo.com/88437726