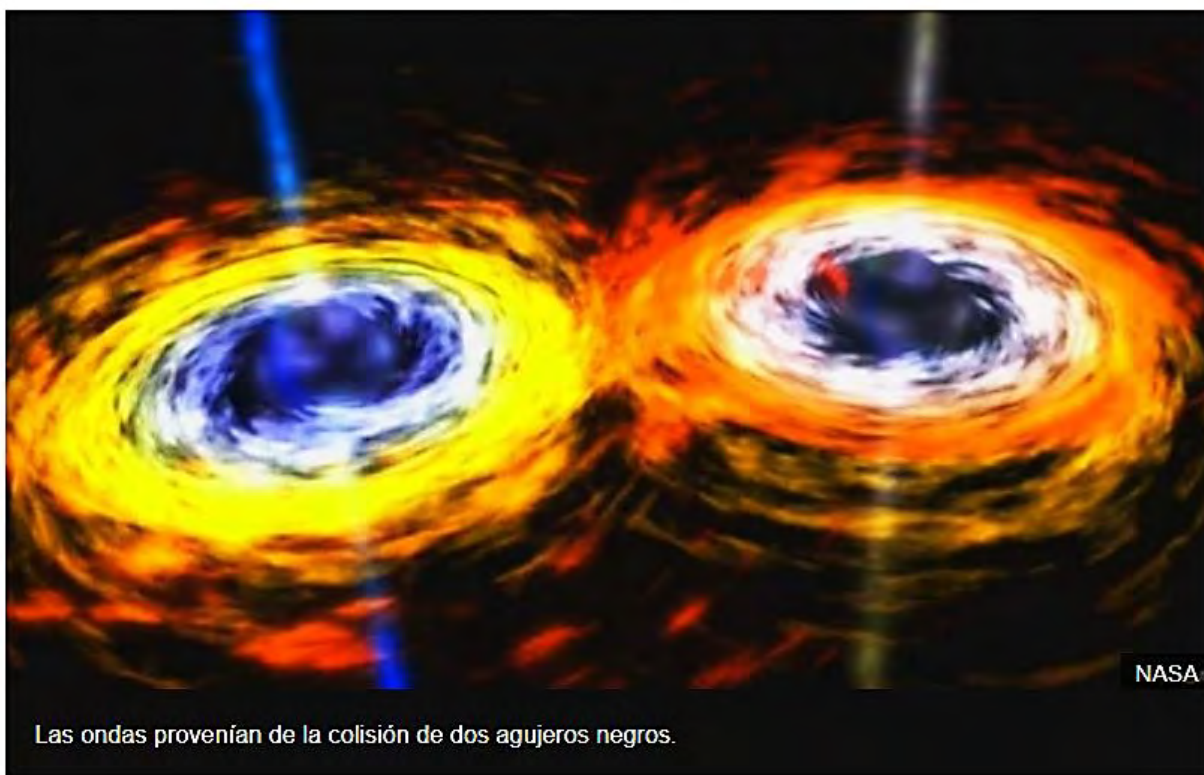


La Gravedad es la Curvatura en el Espacio-Tiempo

Vivimos en Nicaragua dentro de un mundo literario. Por esta época del año, los periódicos nos traen las noticias de quienes ganaron el premio Nobel. Es fácil entender las razones de algunos de los premios; no todos porque hay una ciencia que se escapa a nuestros conocimientos. Motivado a dar una explicación a los premios de Física otorgado a Rainer Weiss, Barry C. Barish y Kip S. Thorne, que son miembros de la colaboración científica LIGO, el observatorio dedicado a detectar las ondas gravitacionales. Ellos detectaron las ondas gravitacionales por primera vez hace apenas dos años, los ecos de una colisión masiva de dos agujeros negros super masivos.



Las ondas provenían de la colisión de dos agujeros negros.

Mi interés no es sólo científico, sino la curiosidad de visitar LIGO Livingston, LA que está a 53 km de la casa de mi hija en Baton Rouge. El caso es que LIGO Livingston está en terrenos de Louisiana State University (LSU) donde trabaja mi yerno y estudia mi nieto. Las visitas al público son los terceros sábados de cada

mes. Visité el observatorio el sábado 21 de octubre. Mi nieta dice haber visitado el observatorio dos veces, y conoce a uno de los científicos que ganó el premio Nobel porque es profesor en LSU por el intercambio de servicios que LSU presta a LIGO.

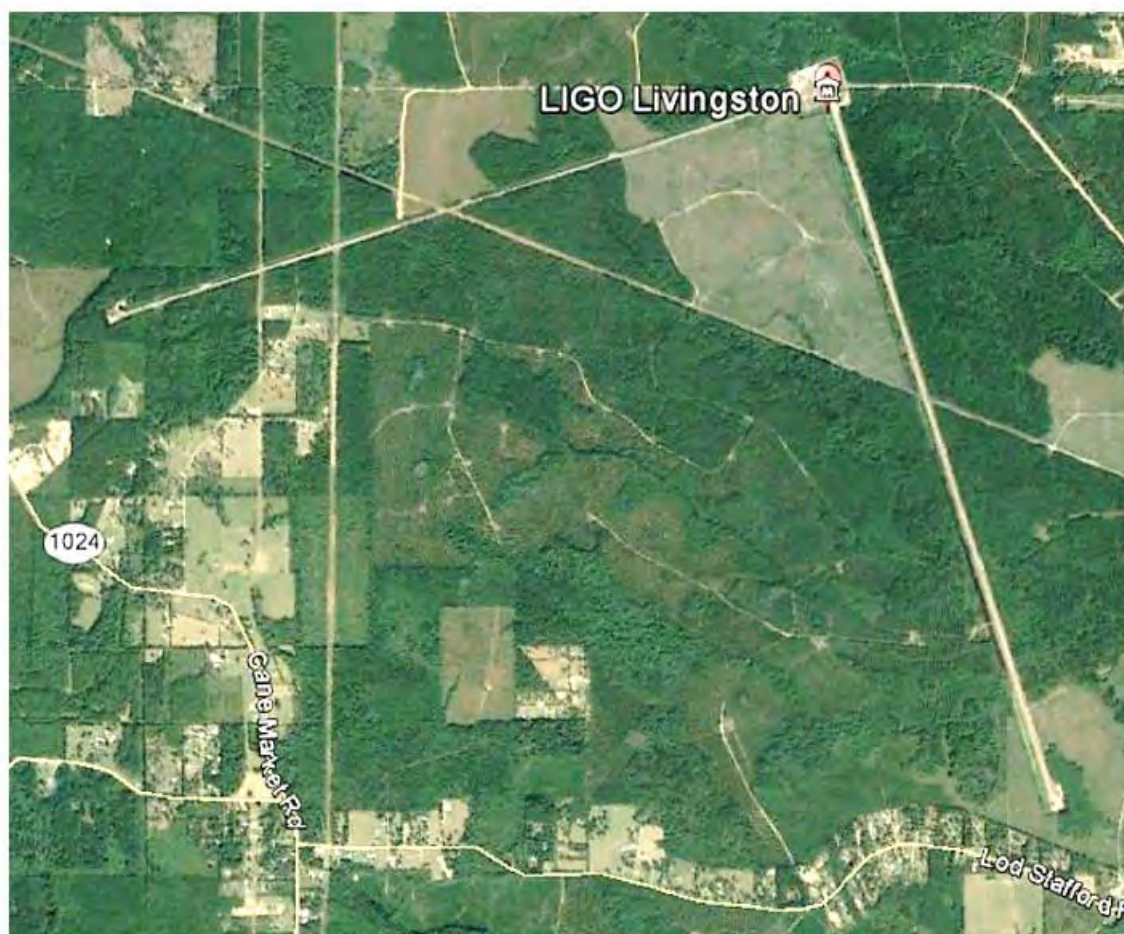


Edicios de LIGO Livingston, LA

Los observatorios suelen tener telescopios para observar los cuerpos celestes mirándolos con las ondas de luz que llegan a la Tierra. LIGO es un observatorio que usa un interferómetro para observar las ondas gravitacionales que llegan a la Tierra, originarias por eventos catastróficos en el Universo. Esos eventos son las supernovas y las fusiones de dos agujeros negros o dos estrellas de neutrones.

Las supernovas se forman por una explosión estelar que puede manifestarse de forma muy notable, incluso a simple vista, en lugares de la esfera celeste donde antes no se había detectado nada en particular. Una estrella de neutrones es un tipo de remanente estelar resultante del colapso gravitacional

de una estrella supergigante masiva después de agotar el combustible en su núcleo y explotar como una supernova tipo II, tipo Ib o tipo Ic. Como su nombre indica, estas estrellas están compuestas principalmente de neutrones, más otro tipo de partículas tanto en su corteza sólida de hierro, como en su interior, que puede contener tanto protones y electrones, como piones y kaones. Un agujero negro es una región finita del espacio en cuyo interior existe una concentración de masa lo suficientemente elevada como para generar un campo gravitatorio tal que ninguna partícula material, ni siquiera la luz, puede escapar de ella.



Brazos del Interferometro LIGO en Livingsgton, LA

Todos sabemos que es la gravedad, una fuerza invisible que parece causar acciones a una distancia sin ningún mecanismo subyacente obvio. Así el Sol trae a la Tierra y los otros planetas, pero el mecanismo de la atracción no es obvio. Ya Aristóteles creía que los objetos caían a la Tierra porque buscaban su lugar natural. Él creía que los objetos más pesados caían más rápido; el peso era una propiedad inherente del objeto. Galileo llevó experimentos científicos y descubrió que un objeto pesado y un objeto ligero caen a la misma velocidad. Un biógrafo

afirmó que lo demostró cayendo dos esferas de la Torre Inclinada de Pisa, pero la historia puede ser apócrifa. En 1971, el astronauta David Scott de Apolo 15 hizo su propia versión del experimento, soltando un martillo de un geólogo y una pluma demostrando que caían simultáneamente sobre el suelo lunar).



Extremo de uno de los brazos del interferómetro. Dentro de este edificio está el espejo que envía el haz de luz de regreso al edificio principal donde está el fotodetector.

Isaac Newton, en la segunda mitad del siglo XVII, desarrolló una ley universal de la gravedad. Calculó que la atracción entre dos cuerpos era igual al producto de sus masas dividido por el cuadrado de la distancia entre ellos. Esto es cierto tanto en la Tierra como en el espacio. Explica las mareas. Explica los movimientos de los planetas alrededor del sol. Esta es una ley básica de la naturaleza, verdadera en cualquier parte del universo. Pero Newton admitió que no entendía la naturaleza fundamental de esta fuerza.

Albert Einstein comprendió que la gravedad y la aceleración son la misma cosa. Su Teoría General de la Relatividad, formulada en 1915, describe la gravedad como una consecuencia de la forma en que las masas curvan el "espacio-tiempo", la estructura del universo. Es pura geometría. Los objetos en movimiento se

moverán por el espacio y el tiempo en el camino de menor resistencia. Un planeta orbitará una estrella no porque esté conectado a la estrella por algún tipo de correa invisible, sino porque el espacio está deformado alrededor de la estrella.

El físico John Wheeler tenía un dicho famoso: "La masa agarra el espacio diciéndole cómo curvarse, el espacio agarra la masa diciéndole cómo moverse".

Arthur Eddington observó un eclipse solar en mayo de 1919 y concluyó que la luz de las estrellas que pasaba cerca del sol estaba, de hecho, doblada de una manera consistente con la teoría de Einstein. El respaldo de Eddington provocó una publicidad global para Einstein que lo convirtió en una celebridad y en la personificación del genio científico.



Brazos de luz en el detector LIGO en Hanford se extienden a través del terreno desértico del sureste de Washington. Cada brazo del detector en forma de L tiene 4.0 km de largo. (Crédito: LIGO)

Una de las predicciones de las ecuaciones de Einstein fue la existencia de ondas gravitacionales - ondulaciones en el tejido espacio-tiempo. Los científicos en las décadas siguientes buscaron esas ondas en vano. En la década de 1960, el físico de la Universidad de Maryland Joseph Weber construyó dispositivos para detectar las ondas gravitatorias, y afirmó tener pruebas de éxito, pero sus hallazgos no se resistieron el escrutinio y la búsqueda de las ondas de Einstein cayó en descrédito.

Uno de los estudiantes de Weber, Kip Thorne, un físico del Instituto Tecnológico de California se unió a varios colegas para anunciar el logro de LIGO, y se aseguró de mencionar a Weber, que murió en 2000. Thorne y otros físicos finalmente persuadieron a la Fundación Nacional de Ciencias para financiar la creación de LIGO, que tiene dos instalaciones, una en Livingston, Louisiana, Y la otra en Hanford, Washington.



Brazo de 4 km de largo del interferómetro LIGO

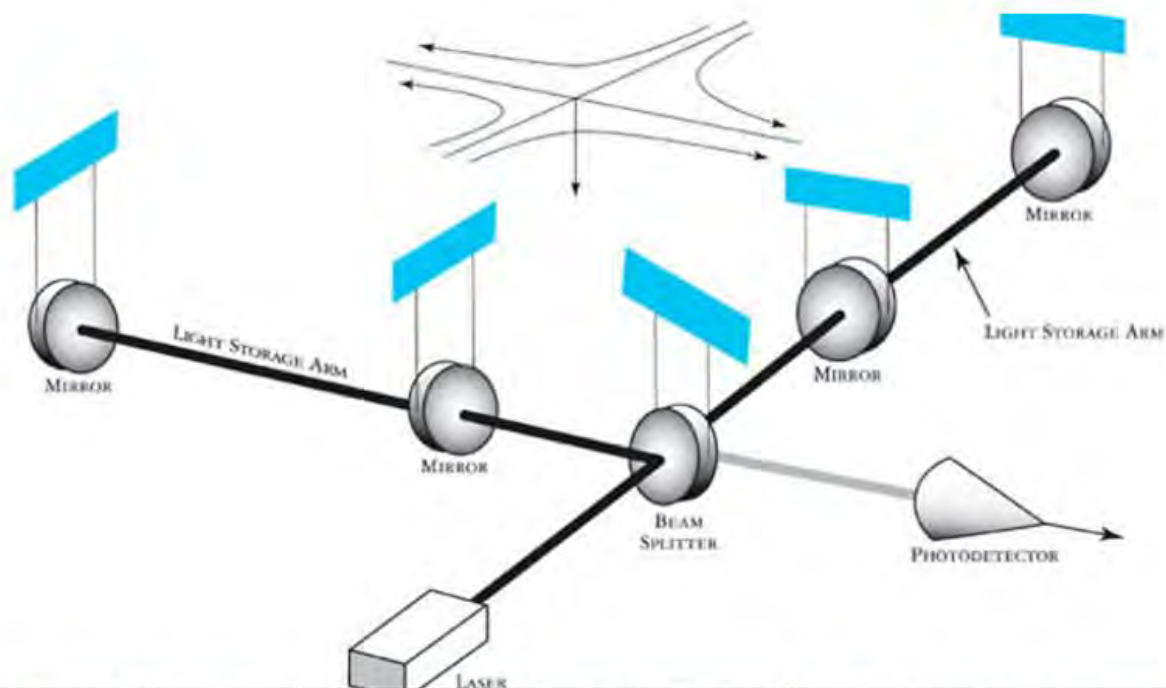
El Laboratorio LIGO opera dos sitios de detección, uno cerca de Hanford en el este de Washington, y otro cerca de Livingston, La. Esta foto muestra el sitio del detector de Hanford. (Laboratorio Caltech / MIT / LIGO).

La historia del poblado de Hanford es interesante. Hanford era una pequeña comunidad agrícola en el condado de Benton, Washington, Estados Unidos. Fue despoblada en 1943 junto con la ciudad de White Bluffs con el fin de dar cabida a la planta de producción nuclear conocida como el sitio de Hanford. La ciudad original, nombrada para el juez y el presidente Cornelius H. Hanford de la compañía de riego, fue establecida en 1907 en la tierra comprada por la energía local y la empresa aguadora. En 1913, la ciudad tenía un ramal del ferrocarril transcontinental de Chicago, de Milwaukee y de San Pablo, también conocido como "el ferrocarril eléctrico". En 1925 la ciudad estaba en auge gracias a la alta demanda agrícola, y se jactaba de un hotel, banco, y sus propias escuelas elementales y secundarias.

Sin embargo, la ciudad fue condenada por el gobierno federal para hacer el camino para el sitio de Hanford. Los residentes recibieron una notificación de desalojo de treinta días el 9 de marzo de 1943. La mayoría de los edificios fueron destruidos, con la notable excepción de la escuela secundaria. Fue utilizado durante la Segunda Guerra Mundial como la oficina de la gerencia de construcción.

El proyecto LIGO tenía sus detractores desde el principio, porque iba a ser caro y podría no detectar nada en absoluto. Estas ondas, si existían, serían extremadamente sutiles. No es como recoger la vibración de un camión que pasa. Las ondas gravitacionales, en teoría, deberían contraer o expandir el espacio en una cantidad casi infinitesimal.

Las ondas gravitatorias pasan a través de todos los medios y no pueden



Esquema básico del interferómetro LIGO, con la onda gravitacional llegando al aparato directamente desde arriba. Mirror: espejo; Photodetector: detector de luz; Beam splitter: divisor del haz luminoso. Los espejos intermedios multiplican la longitud de los brazos hasta una longitud efectiva de 1,120 km cada brazo. La precisión está diseñada para detectar 1/10,000 el ancho de un protón.

ser capturadas directamente. Así que las dos instalaciones LIGO utilizan un rayo láser para tratar de deducir el paso de una onda gravitacional. El rayo láser se divide en dos, con cada parte rebotando en los espejos montados en el extremo de los tubos perpendiculares al vacío de unos 4.0 km de largo. Cuando esos haces escindidos vuelven a converger, deben alinearse perfectamente, a menos que algunas ondas gravitacionales invisibles hayan venido propagándose a través del túnel, estirando un tubo o comprimiendo otro y cambiando así las distancias recorridas por los haces.

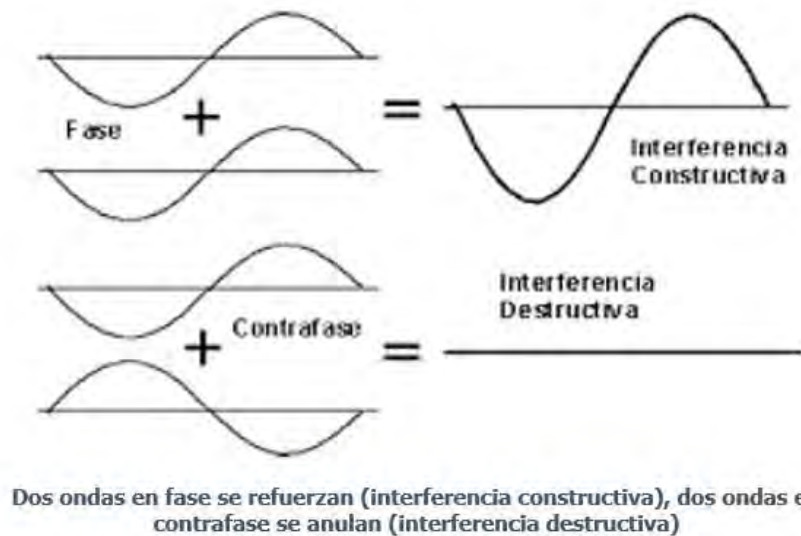
Las ondas gravitacionales representan una nueva forma de información cósmica, es una nueva forma de ver el universo o, para usar una mejor metáfora, de escuchar el universo. Los físicos dicen que esto es como añadir sonido a lo que ya podemos ver.

Las ondas gravitatorias que son detectables por LIGO son causadas por algunos de los eventos más enérgicos en el Universo -agujeros negros en colisión, estrellas explotando, e incluso el nacimiento del Universo mismo.

LIGO es un interferómetro, un aparato inventado en el siglo XIX por Albert Abraham Michelson en 1887. Su funcionamiento se basa en la división de un haz coherente de luz en dos haces para que recorran caminos diferentes y luego converjan nuevamente en un punto. De esta forma se obtiene lo que se denomina la figura de interferencia que permitirá medir pequeñas variaciones en cada uno de los caminos seguidos por los haces.

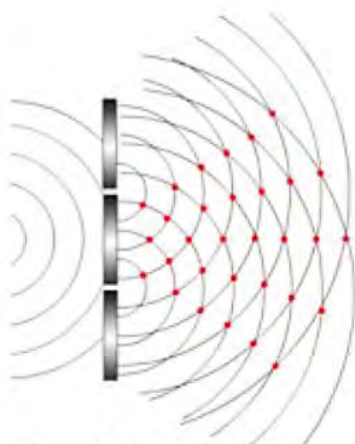
LIGO es un Observatorio de ondas gravitatorias por interferometría láser. La suspensión de los espejos tiene un diseño especial para eliminar vibraciones espurias que puedan modificar la longitud de los brazos del interferómetro.

Las ondas gravitacionales cambian la longitud de los tubos dentro de los cuales viajan los haces de luz. Si la longitud no es idéntica, los haces



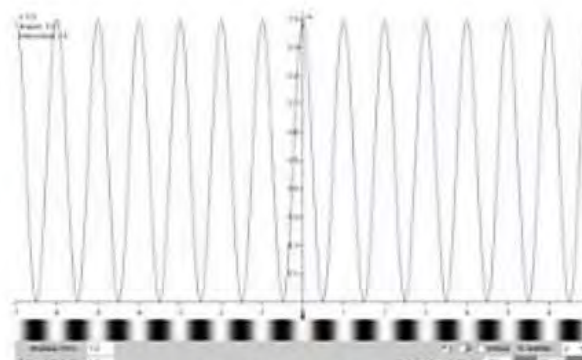
recombinados detectan una interferencia en el fotodetector. La interferencia se manifiesta cuando dos o más ondas se combinan porque coinciden en el mismo lugar del espacio. Cada onda tiene sus crestas y sus valles, de manera que al coincidir en un momento dado se suman sus efectos. La Interferencia constructiva se da cuando dos ondas interfieren, en los puntos en que coinciden las dos crestas se dice que hay interferencia constructiva. En estos puntos se suman las amplitudes de las ondas. En la Interferencia destructiva al interferir dos ondas, en los puntos donde coincide una cresta de una onda con un valle de la otra onda se dice que hay interferencia destructiva. Las amplitudes en este caso se restan y pueden anularse por completo, es decir, se da la oscuridad.

En el experimento de la doble rendija de Young La luz llega a dos rendijas muy estrechas y próximas y cada rendija se convierte en un foco secundario de ondas idénticas que interfieren formando un patrón de luz - oscuridad. Con puntos se señalan en el dibujo las zonas en las que existe interferencia constructiva (luz intensa). Entre ellas se sitúan las zonas en las que tiene lugar una interferencia destructiva (oscuridad). A la derecha se muestra una captura de pantalla en la que se muestra la distribución de los máximos y mínimos de intensidad debidos a la interferencia. En la parte inferior de esa figura se puede ver la distribución de zonas iluminadas (color gris) y oscuras (color negro) resultado de la interferencia de ambas ondas.

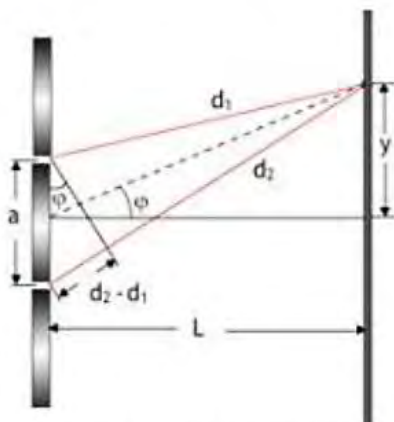


Esquema del experimento de la doble rendija de Young

Las dos rendijas se convierten en focos secundarios de ondas idénticas que interfieren.



Distribución de los máximos y mínimos de intensidad debidos a la interferencia en el experimento de la doble rendija.



$$d_2 - d_1 = a \sin \phi = a \operatorname{tg} \phi = a \frac{y}{L} = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Procediendo de forma análoga se obtiene la situación de las zonas de **interferencia destructiva (zonas oscuras)** :

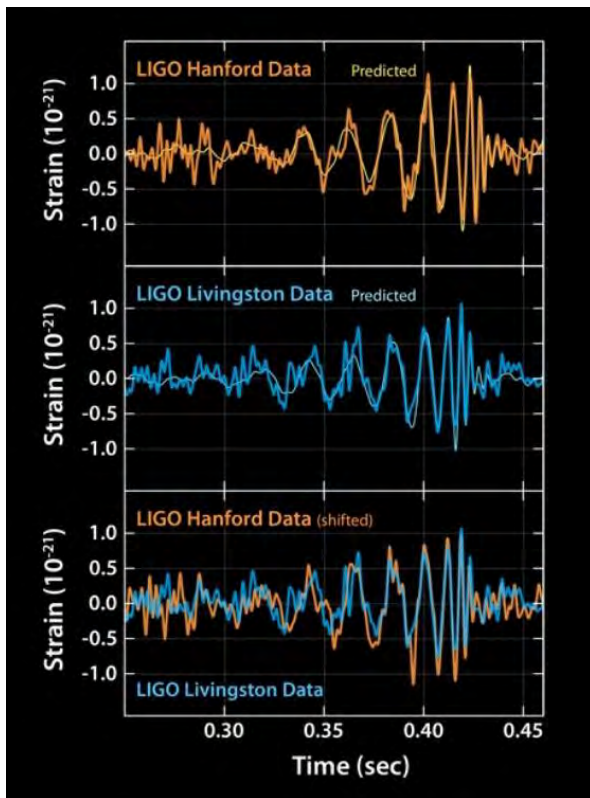


Un mapa de todos los observatorios involucrados en la detección de ondas gravitacionales. Los puntos amarillos son detectores de ondas gravitacionales; Los azules son para telescopios convencionales. (Caltech)

Debido a que los detectores LIGO (Hanford, WA y Livingston, LA) están separados por aproximadamente 3,000 km, puede tomar hasta 10 milisegundos para que una onda gravitacional pase de un detector a otro. Los científicos pueden usar esta diferencia en los tiempos de llegada para medir el origen de las ondas gravitacionales. A medida que se conectan más detectores de ondas gravitatorias, como la instalación de Virgo, cerca de Pisa, Italia, los investigadores pueden hacer un mejor trabajo para localizar las fuentes de ondas gravitacionales.¹

Las ondas gravitacionales fueron detectadas de nuevo el 17 de agosto; esta vez generadas por la colisión de dos estrellas de neutrones. La diferencia está en que esta colisión emite energía en el espectro electromagnético y pudo ser detectada por los telescopios convencionales. La explosión resultante envió una ráfaga de rayos gamma que fluían por el espacio y ondulaban la estructura misma del universo. El 17 de agosto, esas señales llegaron a la Tierra y desencadenaron una revolución astronómica. La colisión distante creó un "kilonova", una maravilla astronómica que los científicos nunca antes habían visto. Fue el primer evento cósmico en la historia que se presenció a través de los dos telescopios tradicionales, que pueden observar la radiación electromagnética como los rayos gamma y detectores de ondas gravitacionales, que detectan las arrugas en el espacio-tiempo producidas por cataclismos distantes. La detección, que involucró

¹ Charles Q. Choi, [Gravitational Waves Detected from Neutron-Star Crashes: The Discovery Explained](#). Space.com



a miles de investigadores que trabajan en más de 70 laboratorios y telescopios en todos los continentes, anuncia una nueva era en la investigación espacial conocida como "astrofísica multimessenger".² ■

² The Washington Post. [Speaking of Science Scientists detect gravitational waves from a new kind of nova, sparking a new era in astronomy.](#) Consultado el 16 de octubre de 2017.