

SEMBLANZAS DE LOS PREMIOS  
NOBEL 2017

## EN FÍSICA

El 14 de septiembre de 2015 los detectores LIGO en los Estados Unidos vibraron por primera vez al detectar Ondas Gravitacionales. Aunque las ondas que se detectaron tenían una intensidad muy pequeña fueron lo suficientemente grandes para provocar un terremoto revolucionario en el campo de la astrofísica. Estas ondas son ahora un medio excelente con el que investigar los fenómenos más violentos que se producen en nuestro universo y una de las formas más apasionantes de probar los límites de nuestro propio conocimiento.

Las ondas detectadas proceden de la fusión de dos agujeros negros que se produjo hace más de mil millones de años sin embargo, aun después de ese tiempo han tenido una utilidad muy importante para la humanidad: demostrar una vez más que las predicciones de Einstein eran correctas. Han tenido que pasar 100 años desde que

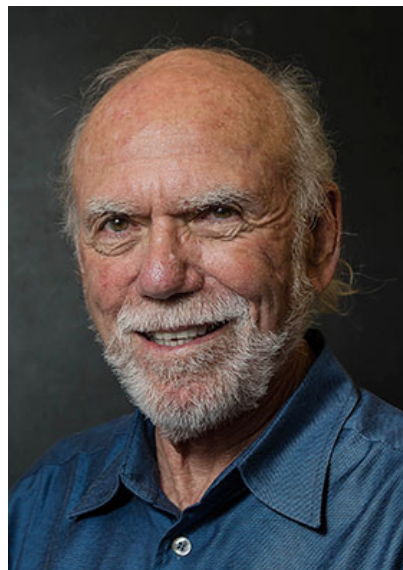
Einstein predijera la existencia de las ondas gravitacionales hasta la primera detección de las mismas; dicha recepción incluso puede haber contradicho una de las pocas predicciones erróneas que hiciese el científico Germano-Americano: que jamás sería posible la detección de las ondas.

LIGO es el acrónimo inglés de “*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*” que no es sino un proyecto colaborativo que agrupa a más de mil científicos de unos veinte países diferentes. Estos científicos han sido capaces de llevar a cabo el mayor experimento de la historia que, además, ha sido uno de los más largos. Juntos han sido capaces de encontrar las ondas gravitacionales tras más de 50 años de búsqueda. Las cabezas visibles de dicho descubrimiento han sido los tres científicos galardonados con el premio nobel de Física de este año: Rainer Weiss, Kip S. Thorne y Barry C. Barish.

Los rumores del descubrimiento hecho en LIGO comenzaron a oírse unos cinco meses antes de que los responsables del proyecto diesen a conocer los resultados definitivos en una publicación en la conocida revis-



Joachim Frank (Berlín, Alemania, 1932). Se doctoró en 1962 en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (EE.UU.). Actualmente es Profesor Emérito Instituto Tecnológico de Massachusetts (EE.UU.).



Barry C. Barish (Omaha, EE.UU., 1936). Se doctoró en 1962 en la Universidad de California (EE.UU.). En la actualidad es Profesor Emérito del Instituto Tecnológico de California (EE.UU.).



Kip S. Thorne (logan, EE.UU., 1940). Se doctoró en 1965 en la Universidad de Princeton (EE.UU.). Actualmente colabora con sus investigaciones en el Instituto Tecnológica de California (EE.UU.).



Figura 1. Estación de detección de ondas gravitacionales LIGO en el Caltech (EE.UU.). Fuente: [www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu).

ta “Physical Review Letters”. En la presentación se dieron a conocer varios registros que daban fe de su descubrimiento: la primera observación experimental de las ondas gravitacionales. Este descubrimiento vino, además acompañado de otro que es de suma importancia pero que ha pasado casi desapercibido por la mayoría de los lectores de la noticia: la existencia de agujeros negros masivos o muy masivos y la capacidad que tienen de fusionarse. De hecho las observaciones corresponden a la fusión de dos agujeros negros cuya masa es de entre 30 y 60 veces la masa de nuestro sol.

En palabras de los propios investigadores la detección de las ondas gravitacionales parece un cuento que corresponde a la Inglaterra victoriana: “Estaba completamente oscuro. Pero no del todo. En un instante percibimos los rumores de dos agujeros negros colisionando y perturbando todo el espacio-tiempo. Como las ondas que se forman cuando una piedra cae en el agua las ondas de la colisión se esparcieron por todo el universo hasta que pudimos detectarlas. Sabemos que se desplazaban a la velocidad de la luz, pero aun así debieron transcurrir algo más de mil millones de años para que alcanzasen nuestra posición”.

LIGO no es un observatorio astronómico usual en el que podemos encontrar un telescopio convencional con el que detectar luz o campos electromagnéticos. Es un instrumento que permite oír las ondas gravitacionales incluso si ellas son pequeños rumores en el propio espacio-tiempo. Desde luego las ondas que detecta no son manifestaciones acústicas como las que percibimos con nuestros oídos.

Durante décadas los científicos han dedicado muchos esfuerzos para conseguir detectar las ondas gravitacionales que “sacuden”, por así decirlo, el universo. Hace un poco más de cien años Einstein indicó que el espacio y el tiempo son maleables y que este espacio de cuatro

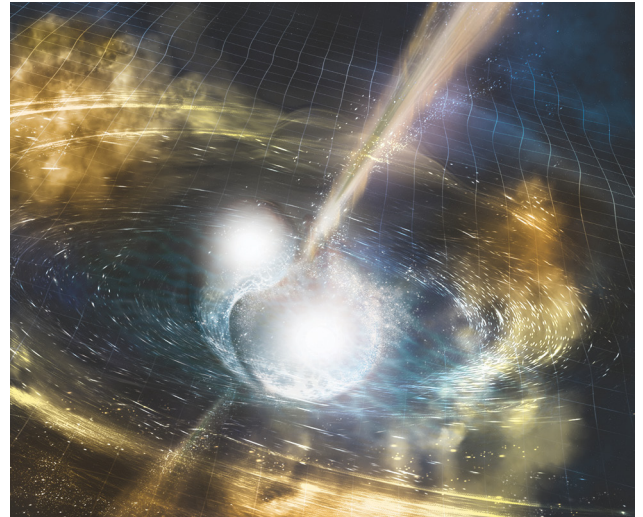


Figura 2. Recreación del colapso de dos estrellas hecho con ordenador. La fusión de las estrellas provocaría el lanzamiento de una cantidad enorme de energía al espacio produciendo perturbaciones en el espacio-tiempo alrededor de la estrella. Fuente: [www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu).

dimensiones debía vibrar produciendo ondas gravitacionales cada vez que una masa se aceleraba en él, existía una colisión de grandes dimensiones o una estrella explotaba.

La existencia de las ondas gravitacionales, como los agujeros negros, se deduce a partir de las soluciones de las ecuaciones de Einstein de la Teoría General de la Relatividad propuesta en 1915. Sin embargo, al igual que pasó con los agujeros negros muchos científicos consideraban que no podían existir y que simplemente eran consecuencias de la resolución matemática de las ecuaciones de Einstein. La teoría de la relatividad explica la gravedad como la curvatura del espacio-tiempo. En aquellos lugares en los que la gravedad es muy grande la curvatura del espacio-tiempo se vuelve muy grande y puede provocar que se forme un agujero negro. Los agujeros negros son los objetos, por así decirlo, más bizarros

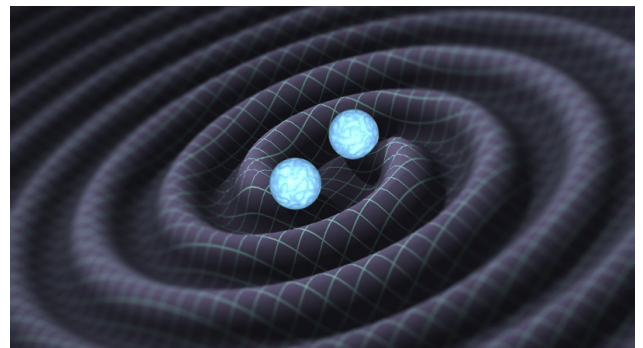


Figura 3. Dos estrellas rotando una entorno a la otra al tiempo que deforman el espacio-tiempo que las rodea. Fuente: [www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu).



del espacio tiempo. Se forman por la acumulación de masa y son lugares de los que nada, ni siquiera la luz, puede escapar. Es por ello por lo que son unos de los objetos más intrigantes en Física y también uno de los que más juego han dado en las novelas de ciencia-ficción.

Las ondas gravitacionales traen consigo la esperanza de que podamos observar nuevas características del universo que nos rodea. De hecho hasta el mismísimo Einstein dudaba de que alguna vez se las pudiese detectar, de que en realidad existiesen. Su colega Arthur Eddington fue incluso más escéptico y en alguna ocasión llegó a señalar que en caso de existir dichas ondas deberán propagarse a la velocidad del pensamiento.

La existencia de las ondas gravitacionales empezó a ser aceptada de forma generalizada a finales de los años 50 cuando algunos cálculos nuevos demostraron que debían transportar energía y ser, por tanto, susceptibles de ser medidas. La primera evidencia indirecta de su existencia apareció en 1970 cuando los astrónomos estadounidenses Joseph Taylor y Russel Hulse usaron un radiotelescopio de largo alcance para observar un par de estrellas (un púlsar doble). En su observación fueron capaces de demostrar que las estrellas rotaban una entorno a la otra siguiendo un movimiento acelerado al tiempo que perdían energía y se aproximaban la una a la otra. La cantidad de energía que se perdía en el movimiento coincidía con la que debían tener las ondas gravitacionales que, en caso de existir, saldrían despedidas desde su posición. Joseph Taylor y Russel Hulse recibieron, por su descubrimiento, el premio Nobel en 1993.

Sin embargo, y como hemos dicho, esto no fue más que una medida indirecta de la existencia de las ondas

gravitacionales cuya existencia debía ser corroborada de forma experimental por medio de medidas directas. La dificultad de observación se debe a que el espacio-tiempo es rígido y no es sencillo perturbarlo de forma apreciable y mucho menos hacerlo de forma apreciable a grandes distancias. Es por ello que solamente procesos cósmicos violentos son capaces de generar ondas gravitacionales susceptibles de ser medidas. Incluso cuando se dan dichos procesos cósmicos violentos la amplitud de las ondas generadas es muy pequeña. Para hacernos una idea de las complicaciones que pueden encontrarse en la detección de dichas ondas diremos que detectarlas es como medir la distancia a una estrella que se encuentre a diez años luz con la precisión del grosor de un cabello. Otra dificultad se encuentra en las pocas oportunidades que se da de detectarlas y de las complicaciones que se dan en el proceso. Por un segundo preguntémosnos, ¿cuál es la probabilidad de que se dé un evento masivo en nuestra galaxia?

Sin embargo y pese a todas estas dificultades ha sucedido: las ondas gravitacionales han sido detectadas. Los dos agujeros negros cuyo colapso se ha detectado estuvieron girando uno entorno al otro desde que se crearon en la fase inicial de la existencia del universo. Con cada uno de los giros deformaban el espacio tiempo en su entorno produciendo una onda gravitacional espiral que se propagaba por el universo, que llevaba energía gravitacional consigo y que hacía que los dos agujeros negros se acercasen más y más entre sí. Dicho movimiento, además se retroalimentaba: cuanto menor era la distancia entre los dos agujeros mayor era su velocidad y mayor la energía desprendida (por unidad de tiempo) lo que provocaba una aceleración en su movimiento. En un determinado instante los horizontes de suceso de los dos agujeros se tocaron provocando el colapso de los dos agujeros con una rapidez inusitada ya que el evento se produjo a la velocidad de la luz. Una vez que se fusionaron los dos agujeros negros se convirtieron en uno solo que dejó de emitir ondas gravitacionales al espacio. Una vez formado el nuevo agujero negro, en principio debió borrarse toda información acerca de cómo se había formado.

Debemos indicar, sin embargo, que no toda la memoria de dicha unión se perdió en el momento de formación del nuevo agujero negro ya que las ondas gravitacionales que se formaron en la unión no desaparecieron sino que permanecieron perturbando el espacio tiempo. La percepción de las ondas, en este caso, fue posible ya



Figura 4. Russel Hulse (izquierda) y Joseph Taylor (derecha) galardonados con el premio nobel de Física de 1993 por el descubrimiento de los púlsares. Fuente: <https://www.nobelprize.org>.

que las masas de los agujeros que se fusionaron eran grandes (alrededor de 30 veces la masa de nuestro Sol) de tal forma que en la unión final se desprendió una cantidad enorme de energía.

Es importante reseñar aquí que la detección de las ondas gravitacionales ha sido un camino muy largo que comenzó hace nada menos que 50 años. Los primeros detectores solo eran capaces de detectar algunas ondas gravitacionales de frecuencias determinadas; de hecho estos detectores eran bastante insensibles a otras frecuencias. Joseph Weber, de la Universidad de Maryland, fue quien construyó el primero de los detectores allá por el año 1960; en aquellos tiempos una gran mayoría de la comunidad científica no solo no pensaba que las ondas gravitacionales existieran sino que incluso dudaban de la existencia de los agujeros negros. Es por ello que cuando en 1970 Weber declaró haber “escuchado” las ondas por primera vez se consideró un éxito. Sin embargo, nadie pudo repetir los resultados del experimento de Weber por lo que casi todos los científicos consideraron que los resultados de Weber eran incorrectos.

A mediados de la década de los 70, en medio de un ambiente de desencanto generalizado en cuanto a la existencia de las ondas gravitacionales Kip Thorne y Rainer Weiss estaban firmemente convencidos de que las ondas gravitacionales podrían ser detectadas y que su detección traería consigo una auténtica revolución de la forma en la que entendemos el universo. Rainer Weiss, de hecho ya había analizado posibles fuentes de sonido de fondo que podrían perturbar las mediciones de las ondas gravitacionales. También había diseñado un detector que consistía en un interferómetro láser que eliminaba esas perturbaciones de las medidas.

Mientras Weiss desarrollaba sus detectores en el MIT en las afueras de Boston (Cambridge) Kip Thorne comenzó a trabajar con Ronald Drever quien ya había desarrollado sus primeros detectores de ondas gravitacionales

en Glasgow. Con el tiempo Drever decidió mudarse con Thorne, trabajar en Caltech e iniciar una colaboración con Weiss. Juntos, Weiss, Thorne y Drever formaron un trio que lideró los avances en el campo durante muchos años. Sin embargo, unos años más tarde Drever decidió regresar a su tierra natal Escocia lo que le dejaría descolgado del proyecto no sin haber contribuido de forma substancial al desarrollo de los instrumentos de medición de las ondas gravitacionales.

De hecho los diseños de los detectores que realizaron dejaron de basarse en los diseños iniciales de Weber en forma de varillas vibratorias para pasar a ser interferómetros láser. El principio de funcionamiento de los nuevos instrumentos se conocían desde hacía mucho tiempo: un interferómetro consiste en un aparato que tiene dos brazos que forman una L. En la esquina en la que se unen los dos brazos y al final de los mismos se suspenden espejos. Una vez que se ha dispuesto el aparato se espera que este interactúe con una onda gravitacional. Cuando esta llega e interactúa con el interferómetro, debido a la disposición de los brazos, uno de ellos se alarga mientras que el otro se encoje. Usando haces de luz láser es posible medir con una gran precisión la deformación que se produce en cada uno de los brazos.

En el caso de que no haya interacción con ninguna onda gravitacional los dos brazos tendrán la misma longitud de tal forma que los haces de luz que viajan a lo largo de ellos irán hasta el final de los brazos y regresarán en fase; es decir, que cuando lleguen a la intersección de los brazos darán lugar una interferencia destructiva o cancelaria. Sin embargo, si por alguna razón uno de los brazos del interferómetro cambia su longitud los dos haces de luz recorrerán distancias distintas dando lugar a una interferencia en la esquina de la L que no es completamente cancelaria. En este caso diremos que debido al cambio de la longitud de uno de los brazos los dos haces de luz no están sincronizados.

Si bien la idea de cómo hacer la medida es extremadamente sencilla su implementación es muy complicada, de hecho sabemos que llevarla a cabo ha costado casi cuarenta años. La razón de esto es que las dimensiones del interferómetro eran gigantescas (de varios kilómetros de longitud) y se necesitaba medir con ellas variaciones de longitud del orden de fentómetros (el tamaño de un núcleo atómico). El plan consistía en construir dos interferómetros y que cada uno de ellos tuviese brazos de unos cuatro kilómetros de longitud; además era necesario que cada uno de los haces de luz que los recorría

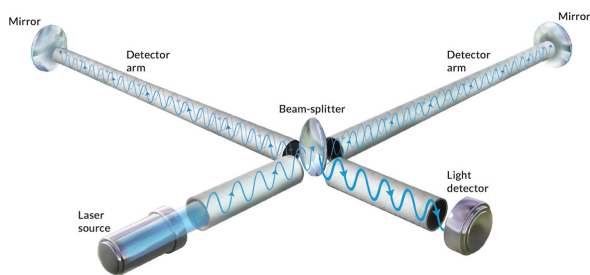


Figura 5. Esquema de las partes del interferómetro LIGO que fue capaz de detectar por primera vez las ondas gravitacionales en septiembre de 2015. Fuente: [www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu).

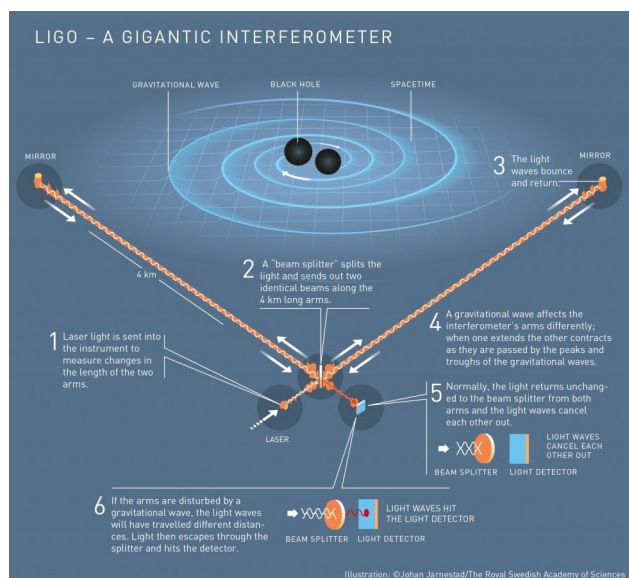


Figura 6. Esquema que describe el LIGO, sus partes, su funcionamiento y nos dice para qué sirve. Fuente: <https://www.pbs.org/newshour/science/ligo-gravitational-wave-collaborators-win-2017-nobel-prize-physics>.

viajase por ellos varias veces de forma que el camino recorrido por la luz fuese mucho mayor e incrementase bastante la posibilidad de detectar las pequeñas deformaciones que se producen en el espacio-tiempo. Se tiene una buena idea del tamaño de los brazos de LIGO si sabemos que uno de los detectores se encuentra situado en la estepa noroeste de los Estados Unidos en las afueras de Hanford (estado de Washington) y su instalación gemela se encuentra en las marismas de Livingston en Luisiana alrededor de unos 3.000 kilómetros más al Sur

Considerando el tamaño del detector y viendo la precisión necesaria para realizar la medida se entiende bien porque se tardaron tantos años en llevarlo a cabo. Obviamente el desarrollo del interferómetro fue una tarea titánica, como así lo fue su construcción. Su construcción requirió análisis sofisticados y precisos y que una mente los desarrollase con mucha paciencia y precisión; es justo decir aquí que ese fue el papel que le tocó jugar a Kip Thorne. Al mismo tiempo fue necesaria una gran inventiva para desarrollar instrumentos ingeniosos capaces de medir aquello que antes no había medido nadie; ese fue el cometido de Rainer Weiss. El experimento entrañaba todo tipo de dificultades ya que tanto la longitud de onda como la intensidad de los láseres que recorrían cada uno de los brazos del interferómetro debían tener una precisión muy grande. Además, los espejos que debían suspenderse al final de cada uno de los brazos debían ser muy estables de forma que el golpeo del láser

sobre ellos se hiciese con la mayor de las precisiones. Los espejos no podían vibrar lo más mínimo debido a causas externas. Uno de los ingenieros que trabajaron en la construcción del interferómetro llegó a decir que incluso la caída de la hoja de un árbol en el bosque cercano al interferómetro provocaba perturbaciones al experimento demasiado grandes. Al mismo tiempo, y para aumentar la complejidad del experimento, los espejos debían ser extremadamente sensibles de tal forma que pudiesen vibrar bajo las interacciones que se pudiesen dar con las ondas gravitacionales. Era necesario incluso minimizar la vibración de los átomos que formaban los cristales de los espejos y evitar todo lo que fuera necesario los efectos cuánticos en el haz láser. Para conseguir las condiciones óptimas del experimento fue necesario desarrollar nuevas tecnologías láser, inventar nuevos materiales, construir tubos de vacío gigantes, aislamientos sísmicos, y muchos otros instrumentos.

De hecho, tras muchos años de trabajo, en 1994 y bajo la supervisión de Barry Barish, el proyecto LIGO sufrió una transformación muy importante: pasó de ser un proyecto nacional estadounidense a un proyecto internacional y el número de científicos participantes pasó de 40 a más de un millar. Barish fue el encargado de encontrar a los especialistas necesarios para llevar adelante el proyecto y de conjugar el esfuerzo de numerosos grupos de investigación de todo el planeta para poder terminar el proyecto LIGO.

En septiembre de 2015 el proyecto LIGO se puso en marcha tras haber estado parado muchos años por las mejoras que sus responsables creían necesarias para que funcionase de forma adecuada para detectar las ondas gravitacionales. En esta parada se equipó al interferómetro con láseres mucho más potentes, con espejos muy ligeros de apenas 40 kilogramos, con sistemas de filtrado de ruido de última generación y con uno de los tubos de vacío más grandes del planeta. Es curioso que, una vez instaladas las mejoras y cuando el interferómetro se encontraba aun en el periodo de prueba se detectase, por primera vez, una onda gravitacional. La onda pasó primero por las instalaciones de Livingston y 7 milisegundos más tarde se encontraba en Hanford a tres mil kilómetros de distancia.

En la madrugada del 14 de septiembre cuando el sistema de información automático de LIGO envió la primera señal de detección casi nadie estaba atento. Sin embargo, en Hannover (Alemania) era ya media mañana lo que hizo que Marco Drago, un joven investigador del





Figura 7. Centros de detección de ondas gravitacionales existentes y previstos. Vemos como existen proyectos para construir detectores incluso fuera de la atmósfera de nuestro planeta. Fuente: [www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu).

Instituto Max Planck de Física Gravitacional vio la señal. En el momento de la detección Marco sintió un gran desconcierto: ¿podía ser que él hubiese sido la primera persona en “oír” una onda gravitacional o lo que había oído no era más que un test rutinario de prueba del equipo? La forma de la onda que se había detectado coincidía exactamente con las predichas para las ondas gravitacionales por lo que la probabilidad de que fuese un test era muy remota. Tras realizar los análisis pertinentes los científicos determinaron que la señal detectada correspondía a una onda gravitacional que había sido lanzada por el objeto de estudio GW 150914 que no era sino un sistema de dos agujeros negros que rotaban uno entorno al otro al tiempo que se acercaban para su fusión. Los investigadores se dieron cuenta de que la señal había sido lanzada por ese sistema binario compuesto por dos agujeros negros de masas 29 y 36 veces la solar. Ambos agujeros se habían fusionado para formar uno mucho mayor, de 62 masas solares y al hacerlo habían radiado energía gravitacional equivalente a tres masas solares. La fusión había hecho que ese sistema fuese, durante una fracción de segundo, el objeto del universo con mayor poder de emisión de energía gravitatoria. La señal, al mismo tiempo señalaba la parte del universo desde la que se había emitido la onda gravitatoria y marcaba la distancia desde la que se había emitido 3.000 millones de años-luz. Para hacernos una idea de la magnitud de escala temporal diremos que esa era la época en la que en la Tierra la vida aún se encontraba pasando de los organismos unicelulares a los multicelulares.

LIGO ha observado otros dos eventos similares desde que detectó su primer descubrimiento. De hecho, la instalación refleja a la americana que se ha instalado en Europa (y que se encuentra en las afueras de PISA (Ita-

lia)) ya el pasado 27 de septiembre ha anunciado su primera detección de un evento. La instalación Europea detectó un evento de colisión de agujeros negros al mismo tiempo que la americana: en este caso provenía de la colisión de dos agujeros negros de tamaño medio y se había producido hace 1.800 millones de años.

Hasta el momento los detectores han sido capaces de registrar cuatro eventos pero se espera que en los próximos años sean muchos más. La India y Japón no quieren perder el tren de los descubrimientos y están ultimando la construcción de detectores en su territorio. Además, estos nuevos detectores y los ya existentes se están preparando para ser capaces de poder identificar la región del espacio de la que provienen las señales. De hecho la detección de las ondas gravitacionales debe ser solamente el inicio de la observación, y debe venir seguido del uso de telescopios ópticos, telescopios de rayos X, etc.

Hasta el momento la observación del universo se ha basado en el uso de radiación electromagnética, la detección de partículas (como rayos cósmicos o neutrinos) y son estas fuentes la que nos han permitido desentrañar un poco los misterios del cosmos. Sin embargo, las ondas gravitacionales son testimonios directos de las perturbaciones que ocurren en el mismo espacio tiempo. Es por ello por lo que esta forma de observar el universo es totalmente nueva y diferente y nos abre la posibilidad de detectar partes del universo que nos estaban vedadas hasta el momento. Se abre la posibilidad de detectar las ondas, capturarlas y usarlas para interpretar el universo, ¿quién sabe a qué descubrimientos nos llevará esta nueva era de detección cósmica?

## REFERENCIAS

- [1] [www.ligo.org](http://www.ligo.org)
- [2] [www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu)
- [3] [www.advancedligo.mit.edu](http://www.advancedligo.mit.edu)
- [4] Collins H (2017). Gravity’s Kiss: The detection of Gravitational Waves. MIT Press. Boston, EE.UU.
- [5] Thorne KS (1994). Black Holes and Time Warps: Einstein Outrageous Legacy. W.W. Norton & Company. Nueva York, EE.UU.
- [6] Collins H (2004). Gravity’s Shadow: the search for Gravitational Waves. University of Chicago Press. Chicago, EE.UU.

Julio J. Fernández Sánchez  
Dpto. de Física Fundamental