

Ondas gravitacionales:

A un año del gran triunfo de la teoría general de la
relatividad

Carlos Velázquez

El 14 de septiembre de 2015 se detectaron por primera vez las ondas gravitacionales predichas por la teoría de la relatividad general de Einstein. Este descubrimiento ha sido considerado como el hallazgo astrofísico del siglo, pero ¿qué son estas ondas y cuál es la importancia de su descubrimiento? A continuación te diremos lo que siempre quisiste saber sobre ondas gravitacionales y no te habías atrevido a preguntar.

Su majestad la teoría general de la relatividad

Para comprender qué son las ondas gravitacionales hay que revisar a grandes rasgos la teoría general de la relatividad. No te preocupes, no haremos matemáticas, sólo explicaremos sus postulados más relevantes. La teoría general de la relatividad es una generalización de la teoría especial de la relatividad de Einstein establecida en 1905. Ésta nos dice que hay una velocidad máxima a la que se pueden transportar la masa y la energía en el universo, la de la luz. Muy

simple, ¿no? Sin embargo para que esto sea posible tenemos que integrar el espacio tridimensional en el que vivimos con la dimensión adicional del tiempo y crear así un nuevo ente de cuatro dimensiones conocido como espacio-tiempo. Hasta aquí no hay mucha complicación, pero el problema de la teoría especial de la relatividad es que sólo es válida cuando los campos gravitacionales no existen o son muy pequeños, y por ello es incapaz de predecir cosas como los agujeros negros y la curvatura de la trayectoria de la luz. Tuvieron que pasar 10 largos años para que Einstein agregara la siguiente pieza que faltaba y que hoy conocemos como el principio de equivalencia; éste dice que los experimentos llevados a cabo en un campo gravitacional son equivalentes a los realizados dentro de un sistema de referencia acelerado. (Digamos que un sistema de referencia es el lugar desde el cual medimos. Si quieres saber todas las sutilezas de este concepto físico te recomiendo echarle un ojo a "1905 y el rompimiento einsteniano: relatividad" aquí en *Cienciorama*)

Para que este enunciado se cumpla el dichoso espacio-tiempo de la relatividad general debe "curvarse" en presencia de la materia y de la luz (ver en *Cienciorama* "Amasando la masa: de Pisa a las pizzas"). La descripción matemática de la curvatura del espacio tiempo es muy compleja, pero podemos darnos una idea de lo que esto significa si comparamos las predicciones de la mecánica de Newton y la relatividad general de Einstein. Veamos, si un rayo de luz pasa cerca de una estrella como el Sol, según Newton no habrá fuerza de atracción alguna ya que la luz no tiene masa, y seguirá su trayectoria recta. En cambio desde el punto de vista de la relatividad la luz siempre trata de ir por el camino más corto entre dos puntos del espacio-tiempo, y como en presencia de la masa de una estrella el espacio-tiempo se curva, lo que resulta es una trayectoria ligeramente desviada de la trayectoria recta, ya que ésta es la ruta más corta a seguir (figura 1).

La predicción

Es posible ver cómo actúa la curvatura del espacio tiempo si visualizamos las masas de las estrellas como bolas de boliche y al espacio-tiempo como la superficie de un colchón de agua: cuando ponemos una bola de boliche sobre el colchón éste se curva (figura 1). En tal caso hemos deformado un espacio

bidimensional --la superficie del colchón-- y le hemos dado curvatura, pero en el caso de la teoría general es más difícil visualizarlo porque estamos curvando nuestro espacio tridimensional al que le hemos agregado el tiempo.

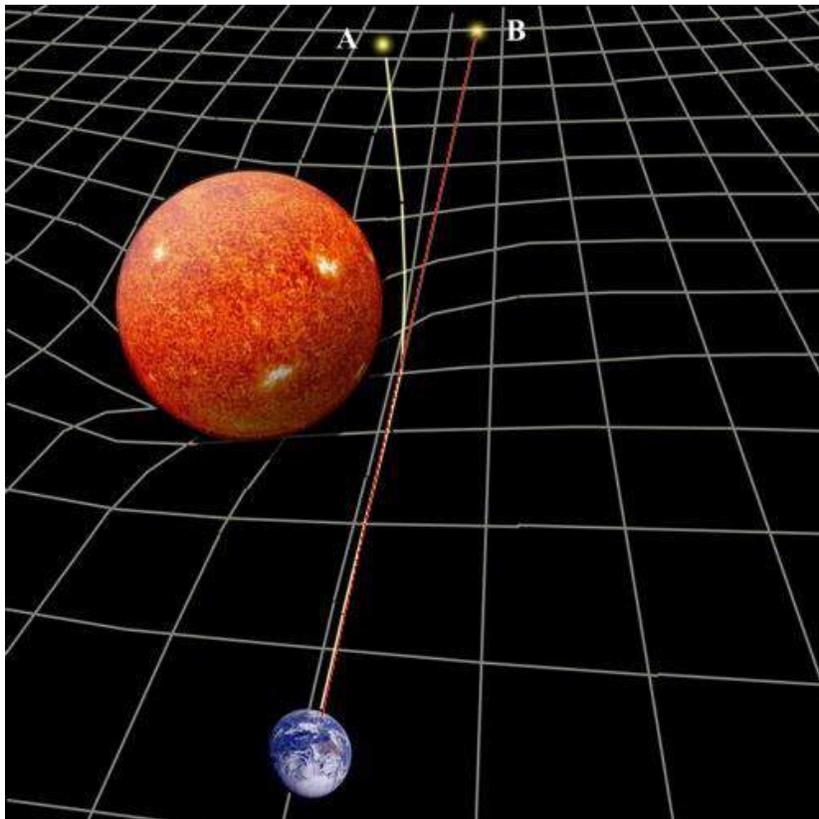


Figura 1. Fenómeno de curvatura de la luz. Al pasar cerca de un objeto masivo, la luz curva ligeramente su trayectoria, como vemos que pasa para la estrella A. En el caso de la estrella B, esto es lo que pasaría según la teoría newtoniana, la luz sigue una trayectoria recta.

http://www.physicsoftheuniverse.com/images/relativity_light_bending.jpg

Pero esta analogía nos puede servir aún más. Imaginemos que tenemos no una, sino dos bolas de boliche, y que tenemos un colchón de agua *king size*. Hagamos lo siguiente: pongamos las dos bolas ligeramente separadas una de la otra en el centro de la cama y pongámoslas a girar, como si las dos estuvieran orbitando alrededor del centro del colchón. Si éste es suficientemente suave, veremos cómo el movimiento produce ondas que van desde el centro hacia el perímetro (ver la imagen inicial del artículo). Sorprendentemente se puede demostrar que el fenómeno análogo es predicho por la teoría general de la

relatividad; esto es, se generan ondas por efecto del movimiento circular de las masas a través del espacio-tiempo, o puesto de otra manera, cuando en lugar de las bolas de boliche lo que tenemos son cuerpos como estrellas de neutrones y en lugar del colchón de agua tenemos el espacio-tiempo sucede lo mismo, aunque en este caso son ondas gravitacionales mientras que en el caso de las bolas de boliche y el colchón son ondas mecánicas ¡Increíble! Este resultado fue predicho por Einstein el 11 de febrero de 1916.

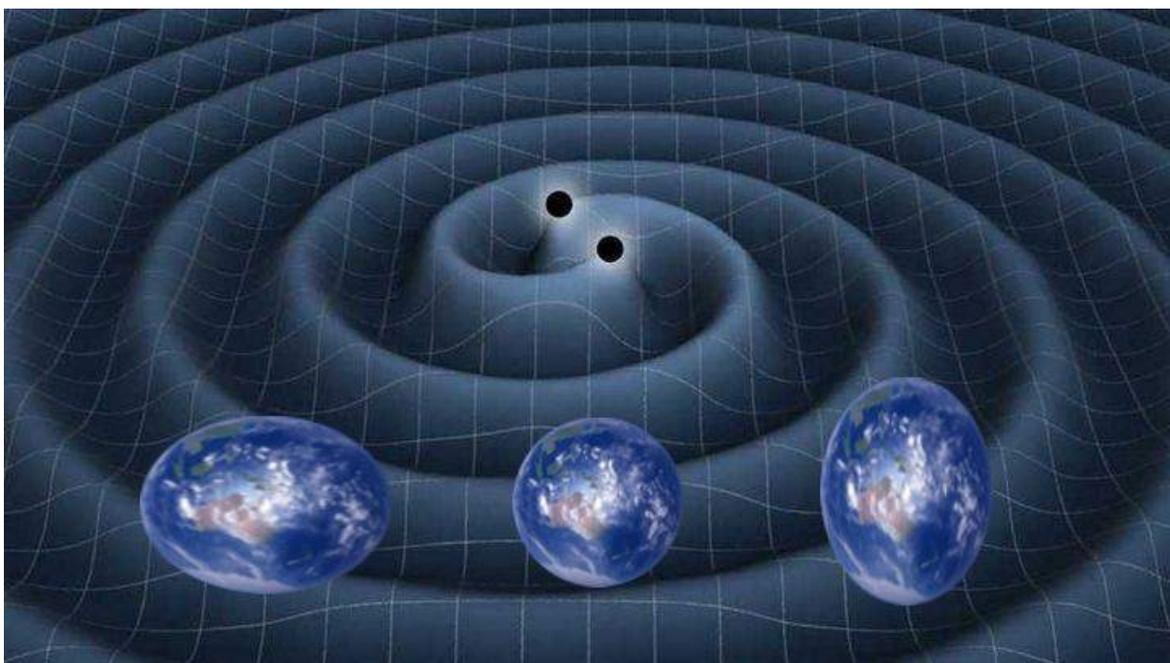


Figura 2. Efecto (exageradísimo) de las ondas gravitacionales al incidir en la Tierra. Las ondas gravitacionales hacen variar la longitud misma de las cosas sobre las que inciden.

<http://blogs.ciencia.unam.mx/>

Con esto podemos imaginar el mecanismo de generación de las dichas ondas, pero nos falta responder una pregunta: ¿cuál sería el efecto de una onda gravitacional al llegar aquí a la Tierra? Bueno, como las ondas gravitacionales afectan directamente nuestro espacio tridimensional y el tiempo, entonces, si una onda gravitacional incidiera directamente sobre ti o sobre mí una parte de nosotros se alargaría mientras otras partes se acortan! (figura 2) Aunque claro, este efecto sería instantáneo y además sería tan pero tan leve, que sería imposible darnos cuenta, ya que las variaciones provocadas por las ondas gravitacionales son tan pequeñas que una longitud de unos 4 kilómetros apenas

varía ¡en el tamaño de un neutrón! Esto es algo realmente difícil de detectar, pero como veremos más adelante, hemos inventado trucos para lograrlo, ya que para la ciencia no hay mejor estímulo que un reto interesante y complicado.

Los pioneros de los pulsares

Aunque en las primeras décadas del siglo XX hubo mucho escepticismo sobre las ideas de la relatividad general de Einstein, a medida que pasó el tiempo y se avanzó en las investigaciones, cada vez más científicos se convencían de su validez, y la búsqueda de evidencias en el universo se hizo cada vez mayor. En el caso de las ondas gravitacionales las primeras evidencias de su existencia se encontraron de una forma casual e indirecta.

En ciencia los descubrimientos suelen seguir un camino inesperado, y las primeras evidencias sobre ondas gravitacionales se descubrirían al analizar un tipo de estrellas muy particular, los pulsares. Éstos son estrellas de neutrones que giran endemoniadamente rápido. Son la última etapa de la vida de las estrellas más masivas y se forman después de que éstas explotaron en forma de supernovas (para saber más sobre evolución estelar puedes ver "Formación estelar" y "¿Cómo se forman los elementos químicos?" aquí en *Cienciorama*). Un pulsar común gira unos cientos de veces por segundo sobre su propio eje. ¡Si la Tierra girara a esta velocidad el día duraría sólo ¡una centésima de segundo! Pero el efecto más sorprendente de los pulsares es que emiten radiación electromagnética a partir de sus polos norte y sur magnéticos, los cuales se encuentran cambiando de posición de manera periódica debido a la rotación de la estrella (figura 2). Son como bolitas con un punto luminoso en sus dos extremos opuestos que gira muy rápido; entonces, si tenemos suerte, podemos detectar los pulsares como puntos que lanzan rayos de luz a intervalos sumamente regulares. De hecho, los pulsares son tan regulares, que sólo se pueden comparar en precisión a los relojes atómicos más poderosos.

Los primeros pulsares que se observaron eran solitarios, pero en 1974 fue descubierto por Russell Allan Hulse y Joseph Hooton Taylor Jr., el primer --y único hasta ahora-- sistema de dos pulsares girando uno en torno al otro y que se nombró PSR J0737-3039 (figura 3). El conocimiento que se tenía entonces sobre los pulsares permitió a los astrónomos saber en todo momento de qué

manera orbitaban, o sea, en qué momento estaban más alejados o más cercanos, y con qué velocidad se movían y se convirtió en el sistema perfecto para probar muchas de las ideas sobre la teoría general de la relatividad, y sobre todo del fenómeno de las ondas gravitacionales. ¿Por qué?

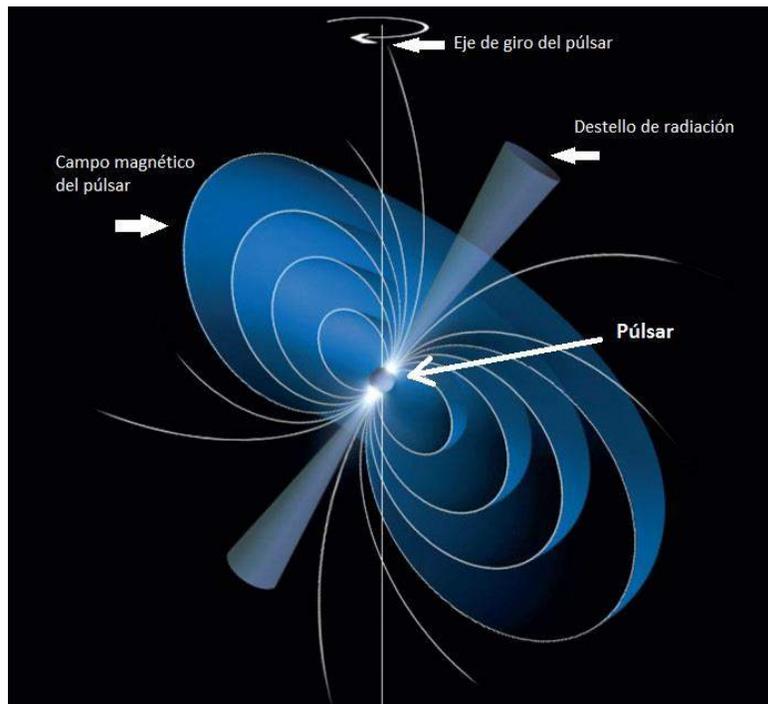


Figura 2. Un pulsar junto con su campo magnético y las dos poderosas emanaciones de radiación electromagnética que sale de sus polos norte y sur magnéticos.

http://images.iop.org/objects/ccr/cern/53/2/13/CCast1_01_13.jpg

Volvamos al caso de las bolas de boliche en el colchón de agua. Mientras giran pierden energía y cada vez se acercan más. Sin embargo, no hay que confundirnos, en el colchón la energía se pierde principalmente porque las bolas al girar tienen que deformarlo y vencer la fricción, y sólo una mínima parte de su energía de movimiento se utiliza para producir las ondas. En el universo ocurre lo opuesto: los cuerpos que orbitan uno alrededor de otro pierden su energía de movimiento principalmente por producir ondas gravitacionales. Cuando Hulse y Hooton calcularon la pérdida de energía rotacional del sistema ¡resultó que las dos estrellas se acercaban año con año exactamente de la forma en la que lo predecía la teoría de Einstein de las ondas gravitacionales! Como dato curioso, se ha calculado que en 300 millones de años ambas estrellas colisionarán.

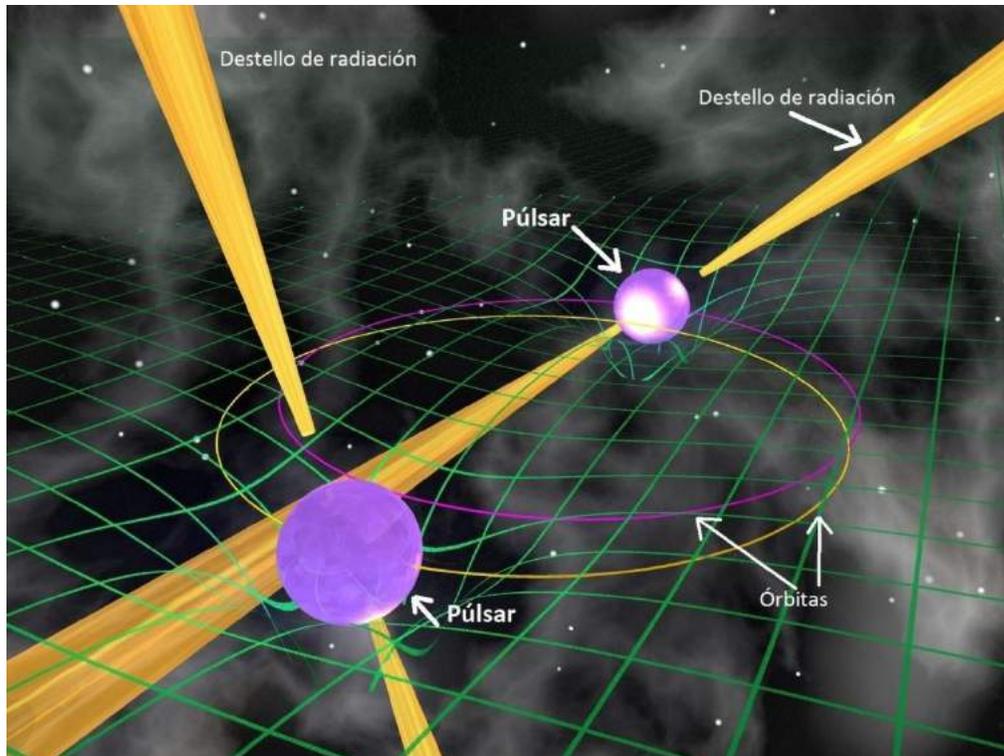


Figura 3. El sistema de dos pulsares PSR J0737-3039, el único sistema binario de pulsares conocido. Imagen de: <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/729373/standard1600.jpg>

Más de uno se hubiera conformado con esta demostración indirecta, y de hecho Russell y Hooton obtuvieron el premio Nobel de física en 1993 por estas mediciones, sin embargo, la ciencia no descansa hasta hacer que sus resultados sean evidentes.

Interferómetros

Poco después del descubrimiento de Russell y Hooton se empezaron a proponer ideas para poder medir las ondas gravitacionales directamente. La idea más prometedora fue concebida por varios científicos tanto en Estados Unidos como en la Unión Soviética durante la década de 1960 y consistió en construir un interferómetro gigante. Aunque esta palabreja es un poco extraña, en lo único que se basa es en la propiedad de superposición de la luz. Ésta no es más que una onda electromagnética, y por lo tanto cuando dos ondas de luz se encuentran, la intensidad del campo electromagnético que detectamos es la suma de las intensidades del campo de cada una de las ondas. De esta manera podemos tener una suma que haga que tengamos una mayor intensidad o bien

podemos ver la cancelación de la onda resultante en algunos lugares, como indicamos en la figura 4 (Para saber más sobre la naturaleza de la luz puedes leer "La luz: ¿onda o partícula?", aquí en *Cienciorama*).

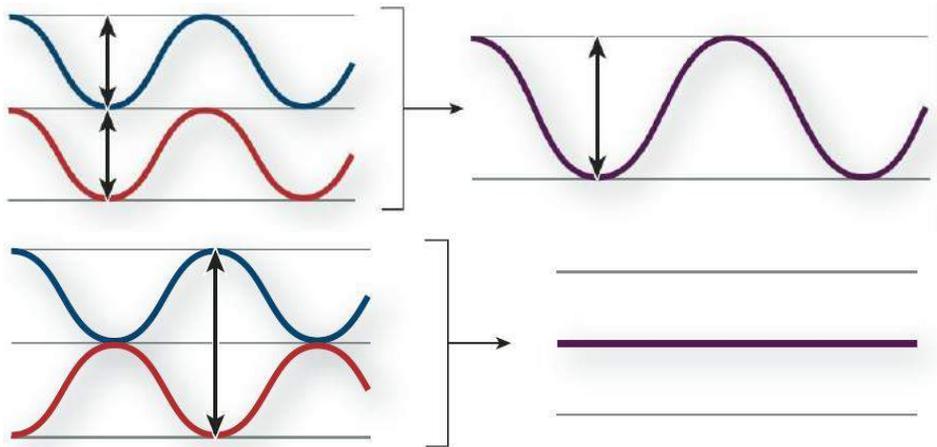


Figura 4. Suma de ondas. Cuando las ondas llegan teniendo la misma amplitud en el mismo sentido hacen una suma constructiva, pero si están desfasadas la suma se anula.

<https://luciaquijanolopez.wordpress.com/2013/01/25/conceptos-basicos-de-audio-digital/>

Lo importante de un interferómetro es que con él podemos saber de manera muy precisa si la longitud de los brazos de la onda es la misma, ya que si por alguna razón ésta varía, obtenemos una variación correspondiente en la intensidad de la luz medida; o sea, podemos usar el interferómetro para medir longitudes, y con bastante precisión.

LIGO y el gran descubrimiento

La propuesta para medir ondas gravitacionales era muy simple: construir un interferómetro súper gigante y súper sensible. La longitud de los brazos es un punto importante, ya que si una onda gravitacional pasa, entonces alargará más la longitud de alguno de sus brazos, y este efecto será mayor cuanto mayor sea la longitud de los dichos brazos (figuras 5 y 6).

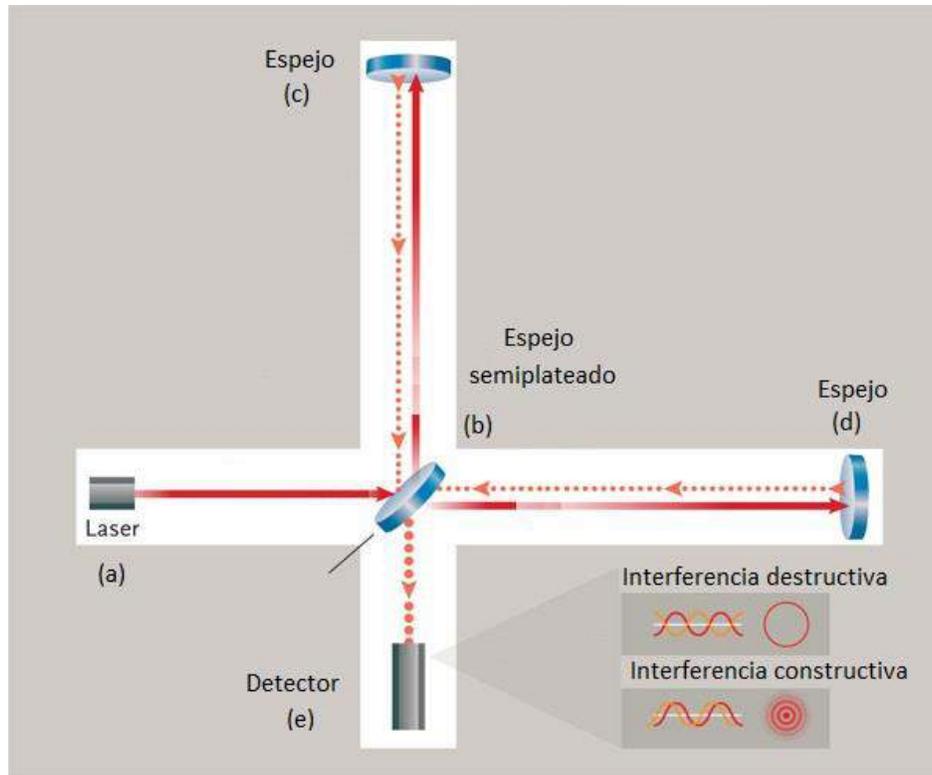


Figura 5. Apariencia y funcionamiento de un interferómetro. En (a) tenemos una fuente de rayos láser; en (b) vemos (en medio) un espejo semiplataado, de modo que sólo refleja el 50% de la luz que incide en él y deja pasar el otro 50%. Después de pasar por el espejo semiplataado la luz viaja a través de los brazos del interferómetro hasta llegar a los espejos en (c) y (d) para regresar de nuevo al espejo semiplataado y combinarse en el detector (e). Cuando la longitud de los brazos es exactamente la misma, entonces se ve un máximo de luz en el detector, pero si por alguna razón la longitud de los brazos varía, entonces la intensidad detectada también variará.

https://www.conatex.com/media/shop_files/03/img_1041743_1--www_1000.jpg
<http://www.skyandtelescope.com/wp-content/uploads/LIGO schematic-600px1.jpg>

Encontrar al mecenas dispuesto a dar los fondos para construir este monstruo científico no fue nada sencillo, pero finalmente el gobierno de los Estados Unidos accedió a financiar el proyecto, y de la mano de Kip Thorne, un catedrático del Caltech, Ronald W. P. Drever de Caltech y de Reiner Weiss del MIT, se inició la construcción del aparato. Para evitar que se detectara una señal espuria se decidió crear dos súper interferómetros, uno de los cuales está en Hanford, estado de Washington y el otro en Livingston, Louisiana, y en conjunto se conocen como el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Medio de

Interferómetros de Láser o LIGO --Interferometer Gravitational-Wave Observatory-- (figura 6). Su construcción comenzó en 1984 y hasta hoy se han invertido cerca de 365 millones de dólares. LIGO es el interferómetro de medición más preciso construido jamás, ya que es capaz de detectar variaciones en la longitud de los brazos mil veces más chicas que el diámetro de un protón.

En su primer periodo de operación entre 2004 y 2010, LIGO no detectó ninguna onda gravitacional. A partir de entonces se hicieron ajustes para mejorar la sensibilidad de sus detectores por lo que estuvo apagado durante varios años.

El anuncio oficial del inicio de operaciones de la nueva versión mejorada de LIGO estaba previsto para el 18 de septiembre de 2015, pero estuvo operando desde el 12 de septiembre. Y así, dos días después de empezar a funcionar y cuatro antes de inaugurarse, la gran señal fue detectada. El acontecimiento fue tan inesperado que los operadores creyeron que se trataba de un error y llamaron telefónicamente a todos los encargados de las distintas áreas de LIGO, pero lo increíble había ocurrido: se había detectado una onda gravitacional por primera vez en la historia.

La señal captada por los dos observatorios de LIGO se detectó exactamente a las 9:50:45 del tiempo universal coordinado, que es el estándar científico de medición del tiempo terrestre. Después de comprobar que la señal no era ruido, los astrofísicos de LIGO se dieron a la tarea titánica de desentrañar lo que había detrás de esta señal, y se fueron llevando sorpresa tras sorpresa.

Para empezar, el análisis reveló que las ondas gravitacionales no habían sido generadas por un sistema de pulsares colisionando, sino por dos agujeros negros, cada uno con masas de 35 y 30 veces la del Sol aproximadamente. Se calculó que el acontecimiento ocurrió a una distancia de 410 megapársecs¹ de la Tierra, o puesto de otro modo, estas ondas gravitacionales han estado viajando por 1.4 mil millones de años a la velocidad de la luz antes de llegar hasta LIGO para ser registradas durante 0.2 segundos. Vale la pena decir que ésta ha sido la radiación energética más poderosa expandiéndose por el universo, detectada hasta el día de hoy, e implicó una conversión de masa en energía equivalente a tres veces la masa del Sol. Para comparar basta saber que la bomba que destruyó Hiroshima sólo convirtió un gramo de masa en energía.

¹ Un meapársec equivale a 30, 857' 118, 509' 369, 537' 280 kilómetros.

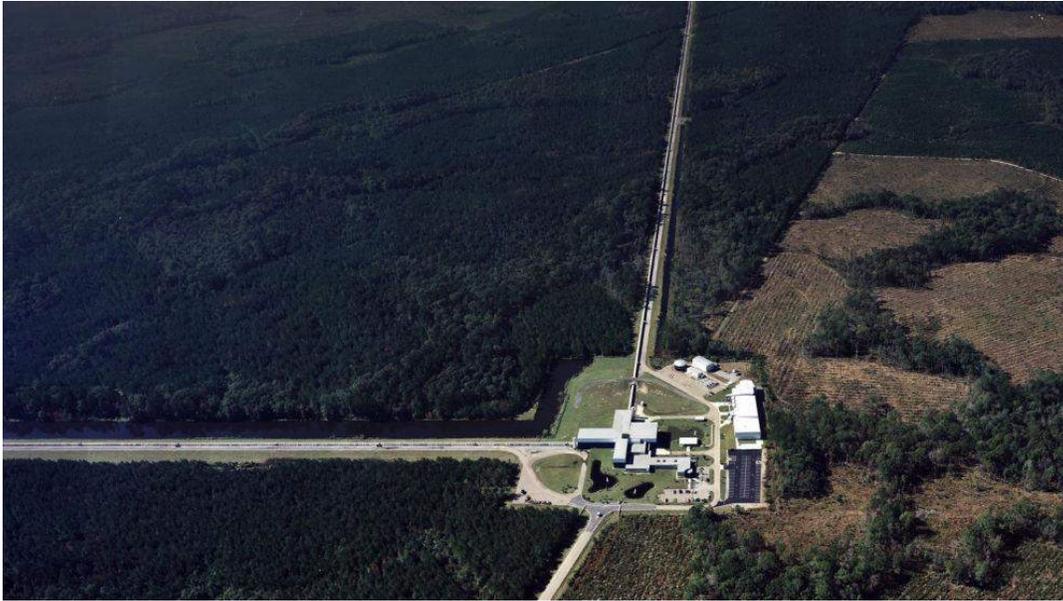


Figura 6. Apariencia de LIGO, cada uno de los brazos que se ven tiene 4 kilómetros de longitud. http://www.elconfidencial.com/tecnologia/2016-02-12/las-ondas-gravitacionales-existen-y-ahora-que_1150885/

Este inesperado fenómeno cimbró a la comunidad astronómica, y nos mostró que la astronomía tiene que extender sus nociones acerca de la naturaleza de las estrellas, ya que no se sabía que hubiera estrellas que pudieran crear agujeros negros con tales características y que pudieran conformar un sistema estable.

Las consecuencias de este fenomenal descubrimiento no se han hecho esperar, y Kip Thorne, Ronald W. P. Drever y Reiner Weiss han sido galardonados con el premio Kavli en astrofísica este año, y el hallazgo ha impulsado la construcción de nuevos detectores de ondas gravitacionales.

Futuro

El hallazgo experimental que prueba la teoría de Einstein es un hito en la historia de la ciencia. Constituye una confirmación más de la teoría de la relatividad general, y también nos dice que es necesario tomar en cuenta nuevos procesos de evolución estelar, pero dependiendo de las observaciones que hagamos a futuro, nos veremos forzados a cambiar nuestra visión del universo si resulta que estos fenómenos son más comunes de lo que pensamos. De hecho, hay una cierta tendencia hacia esto, ya que LIGO ha hecho una nueva detección el 26 de

diciembre de 2015, que se ha interpretado como la colisión de dos agujeros negros de 14 y 7.5 veces la masa del Sol.

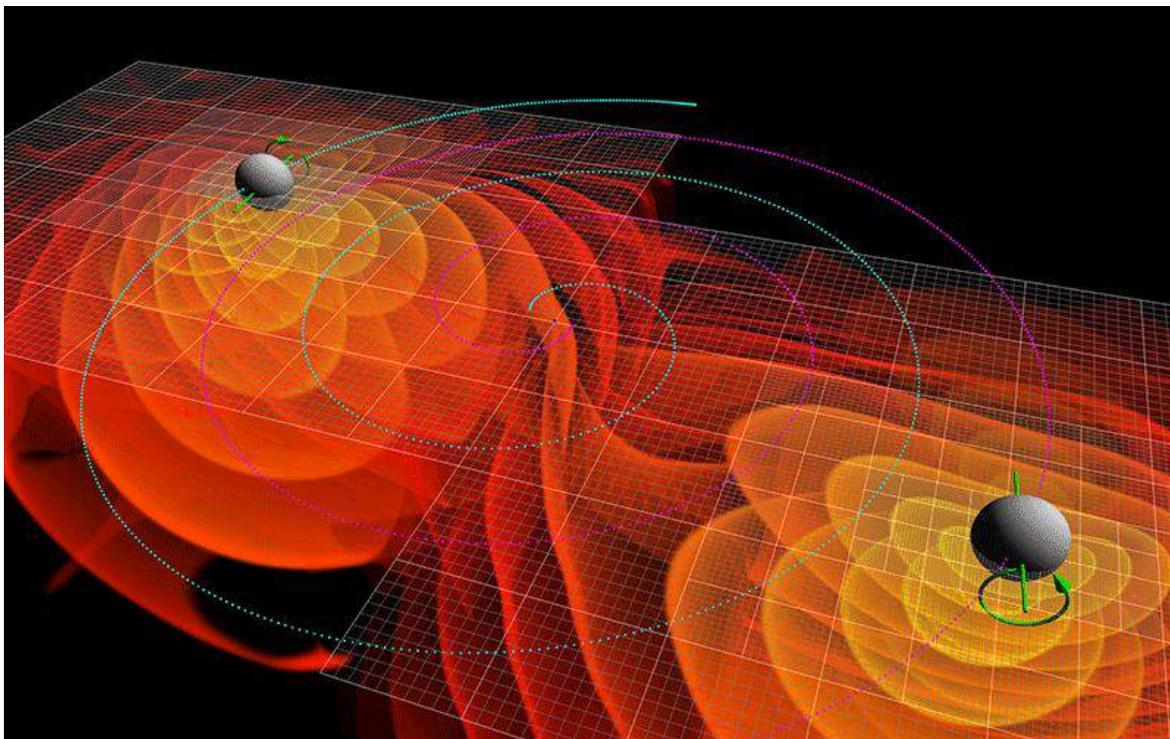


Figura 7. Recreación del sistema de dos agujeros negros orbitando.

<https://physics.aps.org/articles/v9/17>

Sea como sea, una nueva senda en la historia de la ciencia se ha abierto, la humanidad ha logrado realizar la medición de longitud más precisa jamás hecha y siguiendo por este camino podremos llegar a otros descubrimientos, porque han sido identificados nuevos fenómenos astrofísicos y tenemos mucho trabajo teórico por hacer. Como ves la historia no acaba aquí, sino que más bien, comienzan nuevas aventuras en la historia de la astronomía que sólo las futuras generaciones sabrán hasta dónde pueden llegar.

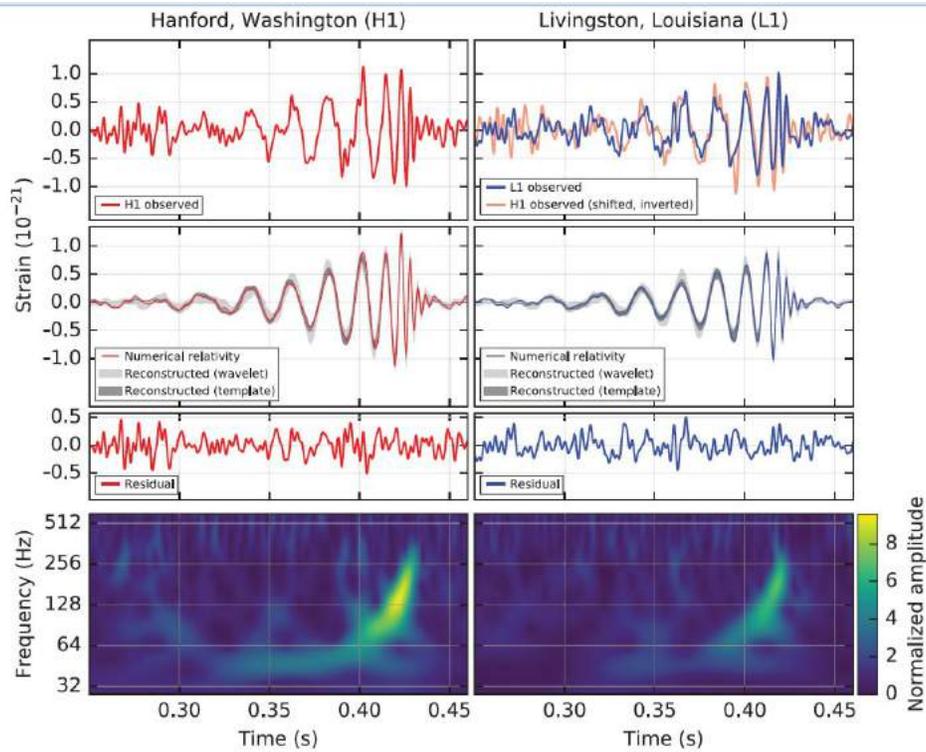
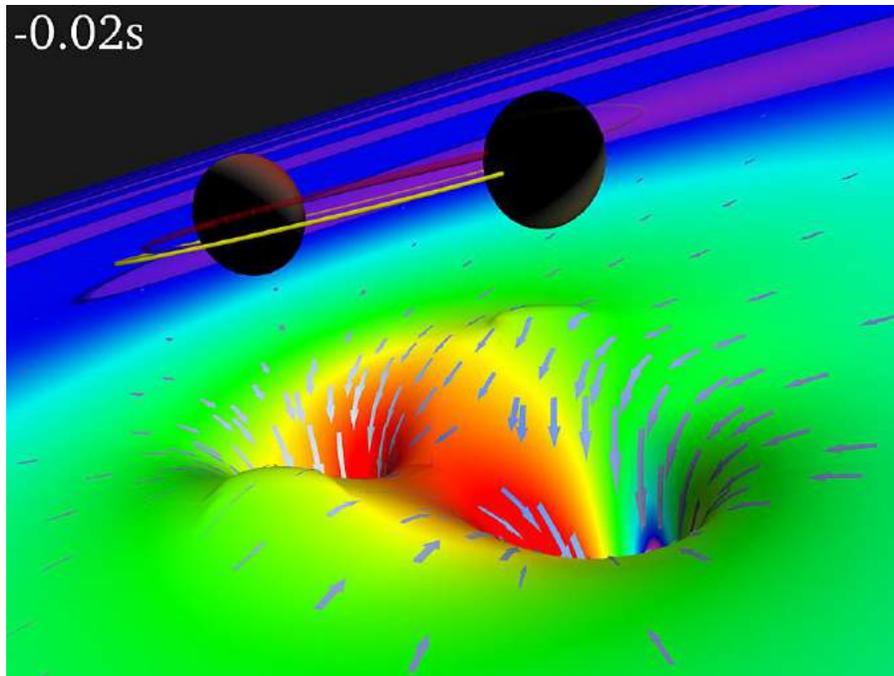


Figura 8. Recreación de los agujeros negros y el espacio-tiempo poco antes de la colisión y detalle de las mediciones hechas por LIGO.

http://astronomynow.com/wp-content/uploads/2016/03/merging_black_holes_940x705.jpg

<http://physics.aps.org/featured-article-pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

Bibliografía

- Michael Kramer, "The Double Pulsar", *Seminare Poincaré*, IX (2006) 63-89, Francia.
- B. P. Abbott et al., "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", *Physics Review Letters* 116, 061102 (2016), EUA.
- Chris Haniff, *Principles of interferometry. Astrophysics Group, Cavendish Laboratory*, University of Cambridge, UK, 2010.
- Martin Hendry, *An Introduction to General Relativity, Gravitational Waves and Detection Principles*, University of Glasgow, UK, 2007.
- J.F.J. van den Brand y C. Van Den Broeck, *General Relativity and Gravitational Waves*, University of Amsterdam, Países bajos, 2011.
- Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 3a edición, volumen 7, Academic Press, 2002.
- 100 años después. Cienciorama, sección de noticias, #289.

Videos

-Video de una excelente charla en el Instituto de Astronomía en el tema de ondas gravitacionales:

<https://videocenter.westtelco.com.mx/videos/video/264/in/channel/6/>

- *Gravitational Waves: A New Era of Astronomy Begins*:

<https://www.youtube.com/watch?v=xj6vV3T4ok8>

-Simulación de de la colisión de dos agujeros negros: *Warped Space and Time Around Colliding Black Holes*:

<https://www.youtube.com/watch?v=1agm33iEAuo>

Imagen inicial

http://ichef.bbci.co.uk/news/ws/640/amz/worldservice/live/assets/images/2016/02/12/160212043115_sp_gravitational_waves_640x360_epa_nocredit.jpg