

# Nobel de Física 2017

## El descubrimiento de las ondas gravitacionales

*Rafael Bachiller*

Astrónomo, director del Observatorio Astronómico Nacional (IGN)  
y académico de la Real Academia de Doctores de España.

### Resumen

El Nobel de Física 2017 fue concedido a Rainer Weiss, Barry Barish y Kip Thorne por la detección y observación de ondas gravitacionales con la colaboración LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*). Este hallazgo científico viene a confirmar definitivamente la teoría de la relatividad general de Einstein, también fue objeto del Premio Princesa de Asturias 2017 y ha sido considerado el Descubrimiento del Año en los años 2016 y 2017 por la revista 'Science'.

Poco después de la concesión del Nobel, la colaboración LIGO confirmó una cuarta detección de este sutil tipo de ondas que deforman el tejido del espacio-tiempo. En el presente artículo recorreremos la apasionante historia de todos estos hallazgos, su significado científico y su impacto en el conocimiento humano.

### 1.- 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 científico 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.

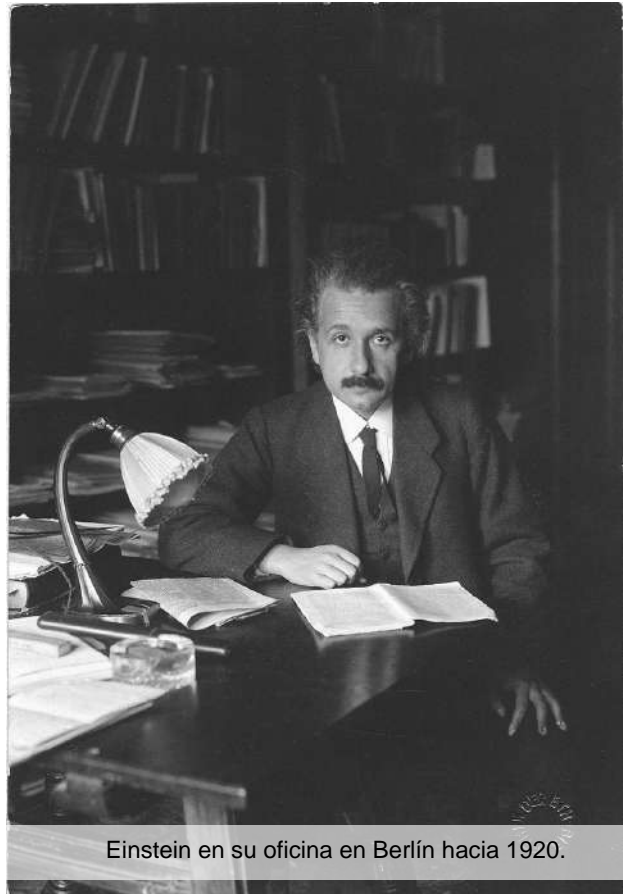
En noviembre de 1915 Einstein se encontraba en Berlín y era víctima de varias guerras. La primera, la mundial, había penetrado en los despachos del instituto dirigido por el químico Fritz Haber en donde trabajaba Einstein. Los tres científicos que le habían atraído a Berlín -Max Planck, Walther Nernst 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 presentó unas ecuaciones revisadas que

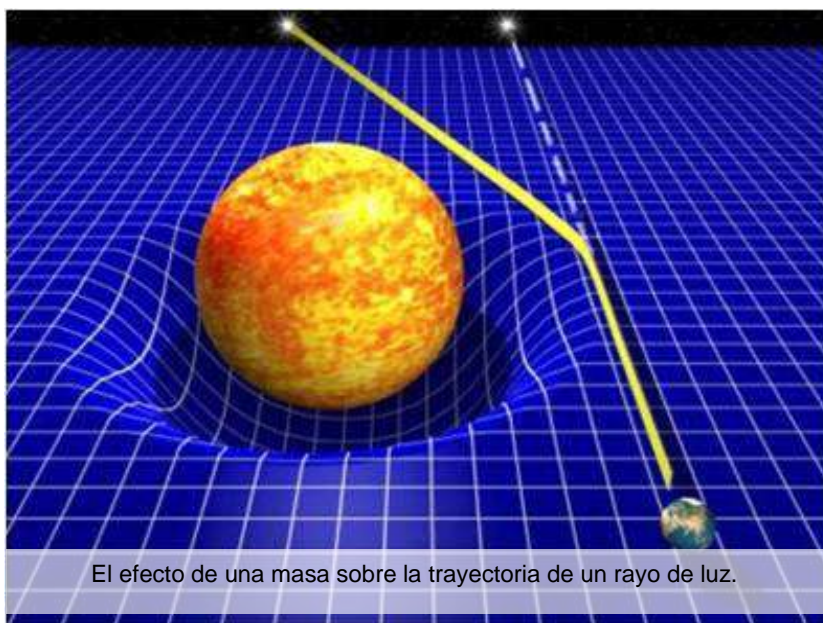


Einstein en su oficina en Berlín hacia 1920.

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 aquél 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.

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

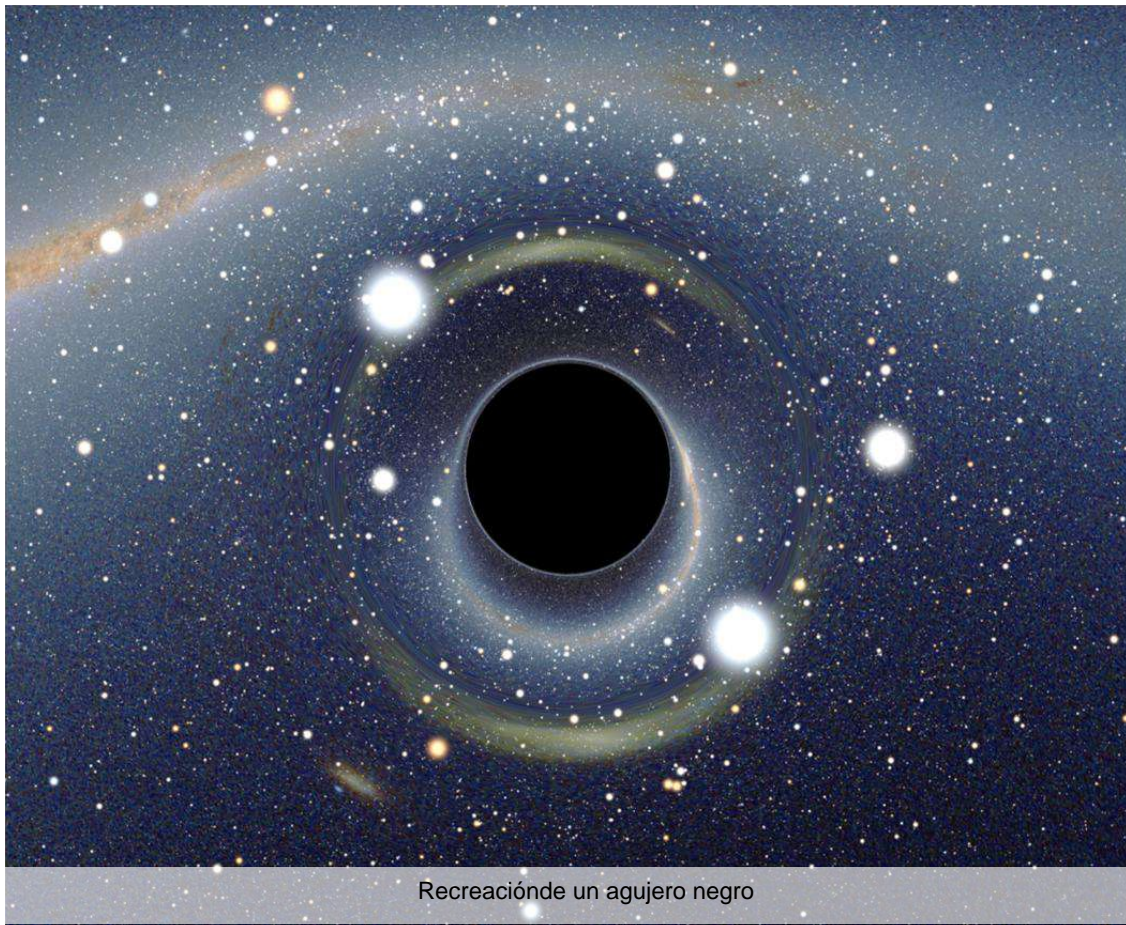


El efecto de una masa sobre la trayectoria de un rayo de luz.

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.

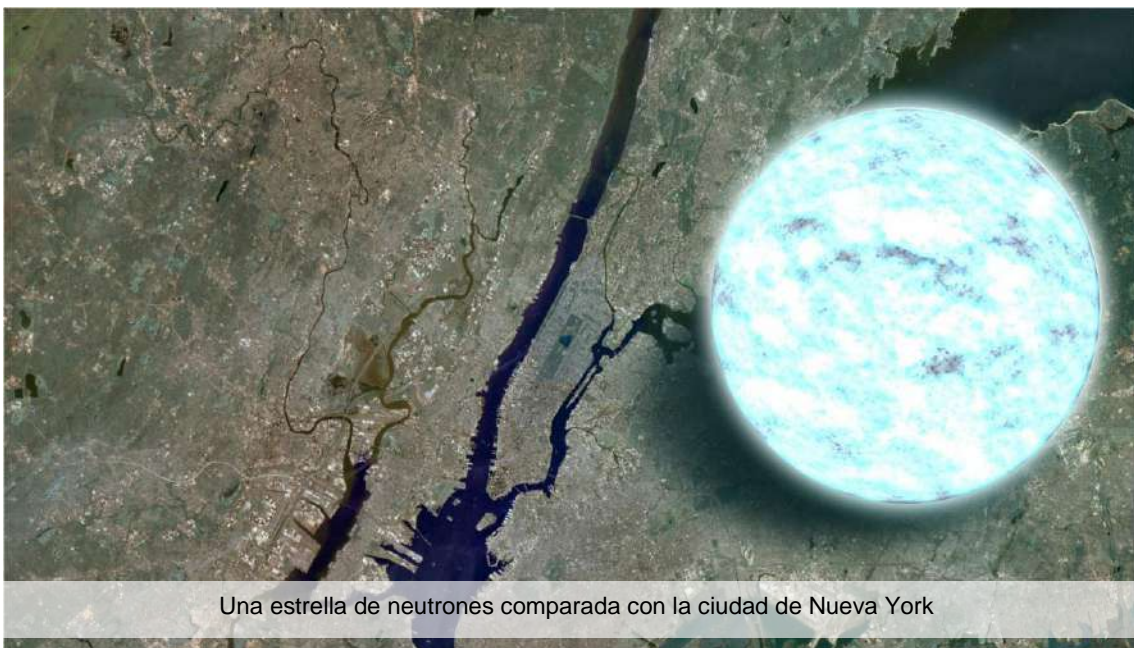


Conviene destacar, sin embargo, que la relatividad general no solo trata de elucubraciones teóricas y de descripciones de situaciones astrofísicas extremas. Como es el caso para otras teorías, la relatividad general es un resultado de la ciencia básica que encuentra grandes

aplicaciones tecnológicas en la vida cotidiana. Por ejemplo, gracias a la relatividad general funciona una tecnología que hoy puede parecerse 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.

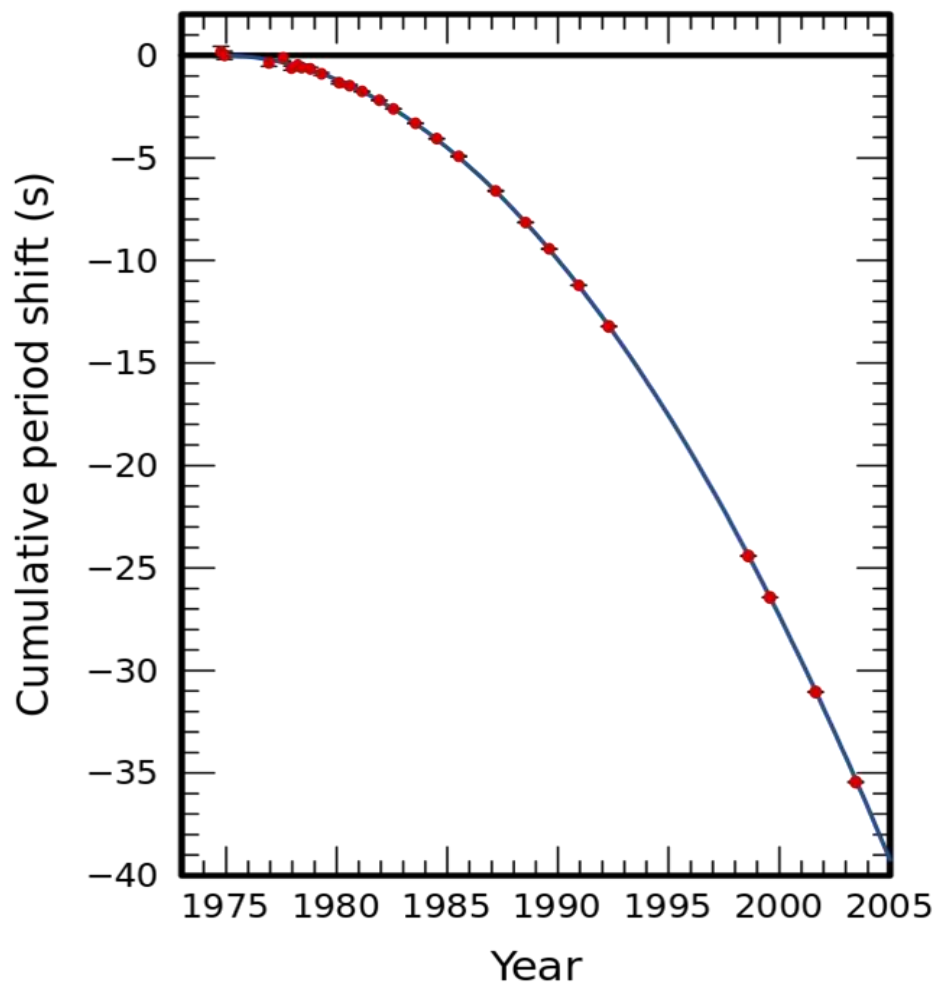
## 2.- Ondas en el espacio-tiempo

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*).



Una estrella de neutrones comparada con la ciudad de Nueva York

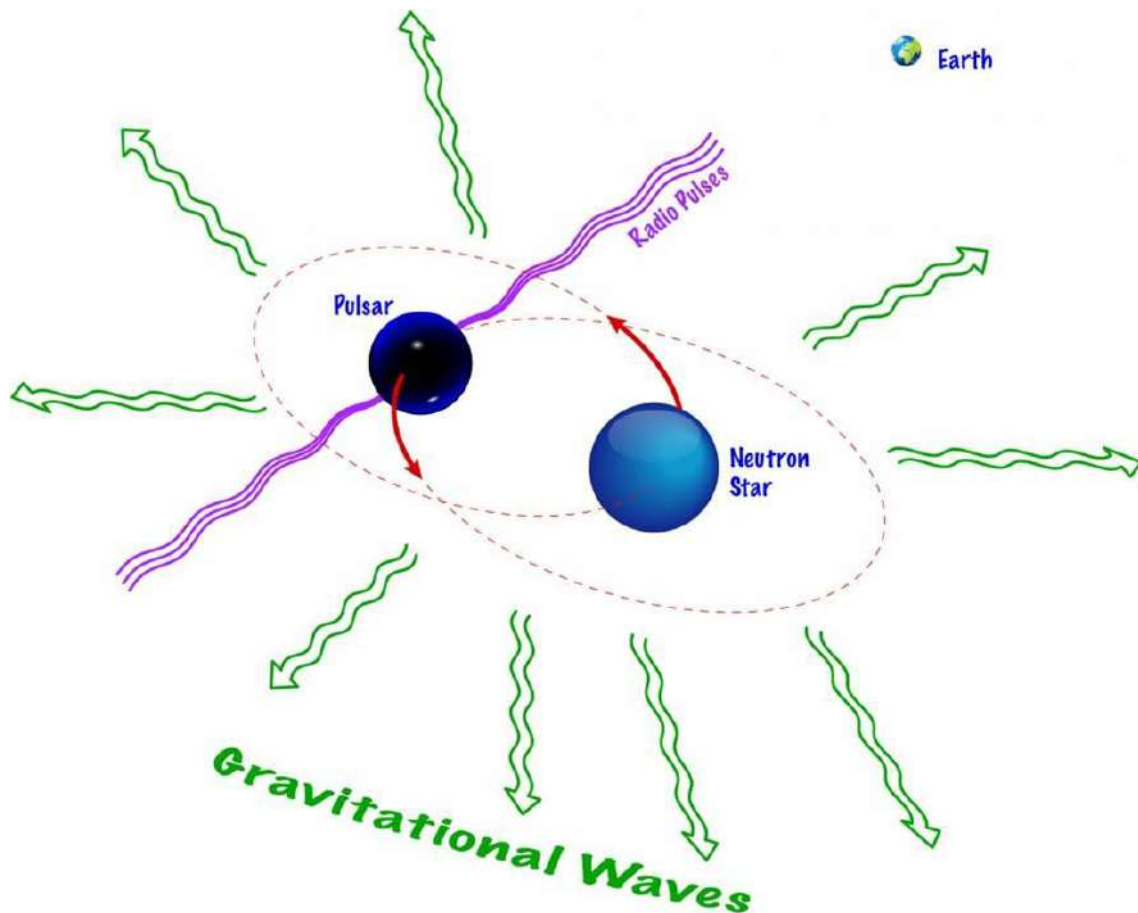
Pero no es ésta la primera indicación observacional de la existencia de las ondas gravitacionales. En 1993, Russell Hulse y Joseph Taylor recibieron el Nobel de Física por el descubrimiento de un pulsar binario (esto es, un par de estrellas de neutrones orbitándose mutuamente) en el que el período orbital 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.



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.

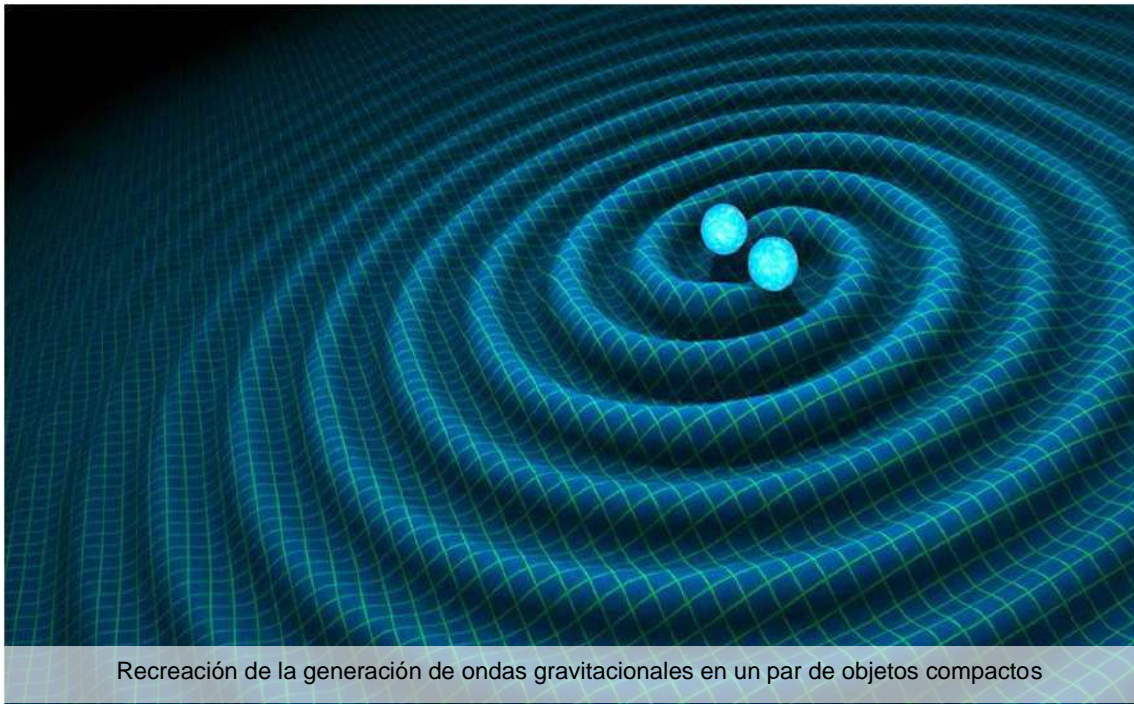


Esquema de la generación de ondas gravitacionales en un par de estrellas de neutrones

### 3.- 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 el estado de Washington y otra en el 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.

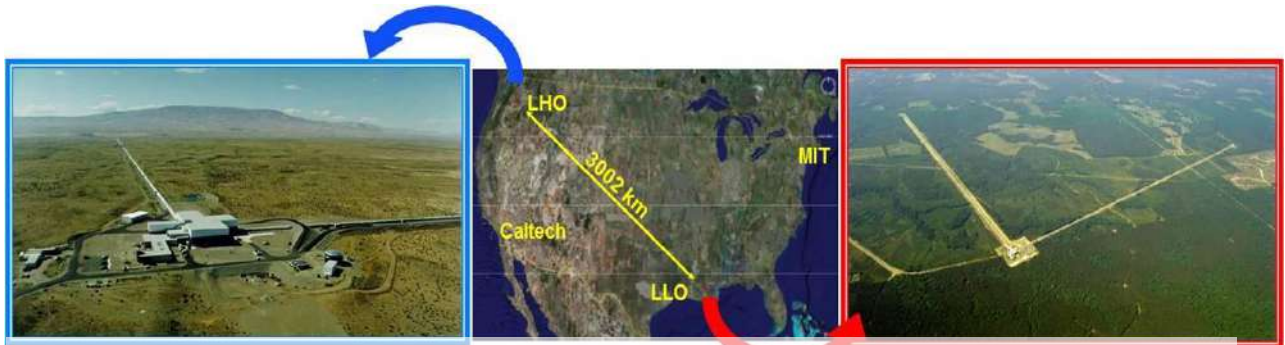


La Colaboración Científica LIGO (LSC, por sus siglas en inglés) es un grupo de 1.167 científicos del campo de la física de más de un centenar de universidades e instituciones de dieciocho países, cuya misión principal es la detección directa de ondas gravitacionales con el objetivo de emplearlas en la 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.

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, el set de detectores se completó 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

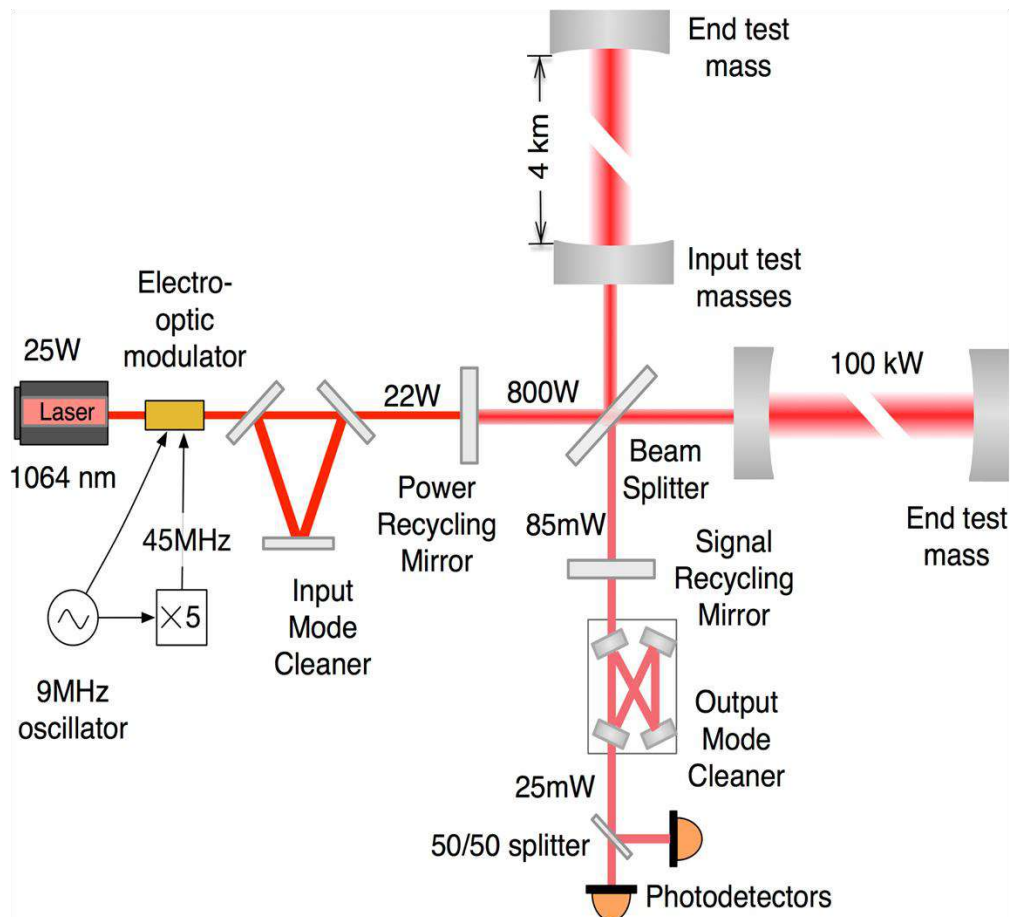


ninguna detección, aunque los datos recabados sirvieron para un rediseño completo de los instrumentos e infraestructuras. Estas mejoras se estuvieron realizando hasta 2014, cuando el denominado Advanced LIGO comenzó a funcionar con un aumento significativo de la sensibilidad y del volumen del universo a explorar.



Los dos observatorios LIGO | LIGO

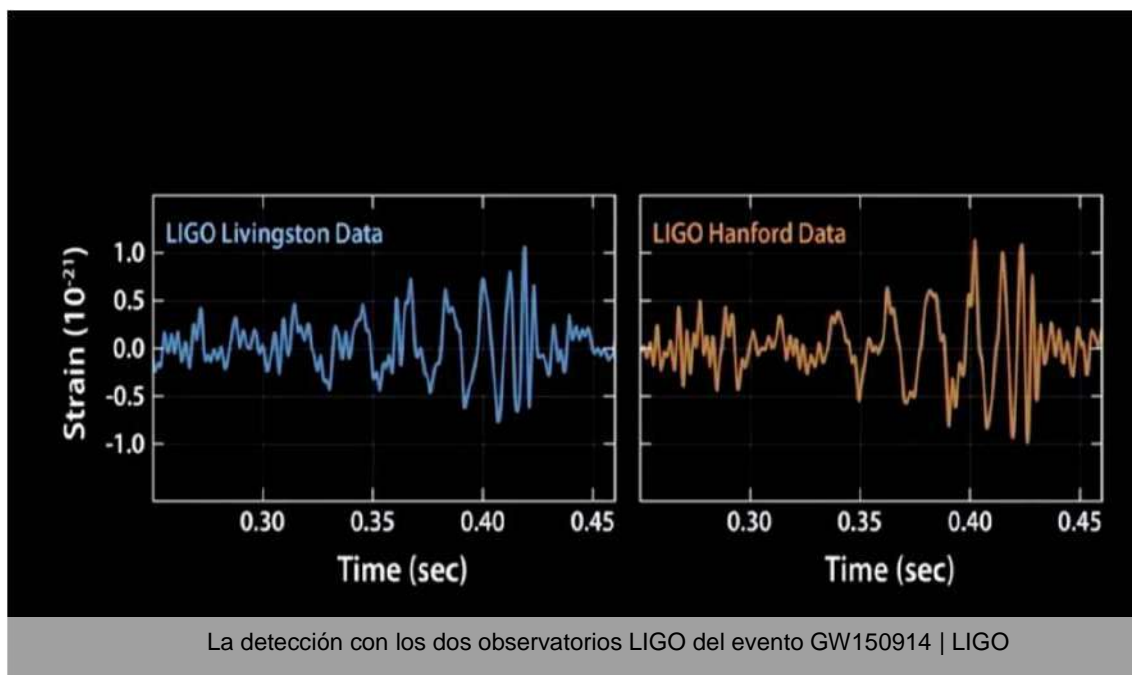
La LSC se financia a través de recursos públicos y privados procedentes de instituciones como la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos, el *Science and Technology Facilities Council* de Reino Unido, la Sociedad Max Planck (Premio Príncipe de Asturias de Cooperación Internacional 2013) y el Estado de Baja Sajonia (Alemania), además de otros organismos de Australia, India, Italia, España, Hungría, Corea, Canadá, Brasil, Rusia, Taiwán y Estados Unidos.



Esquema del interferómetro de Michelson que conforma cada observatorio LIGO | LIGO

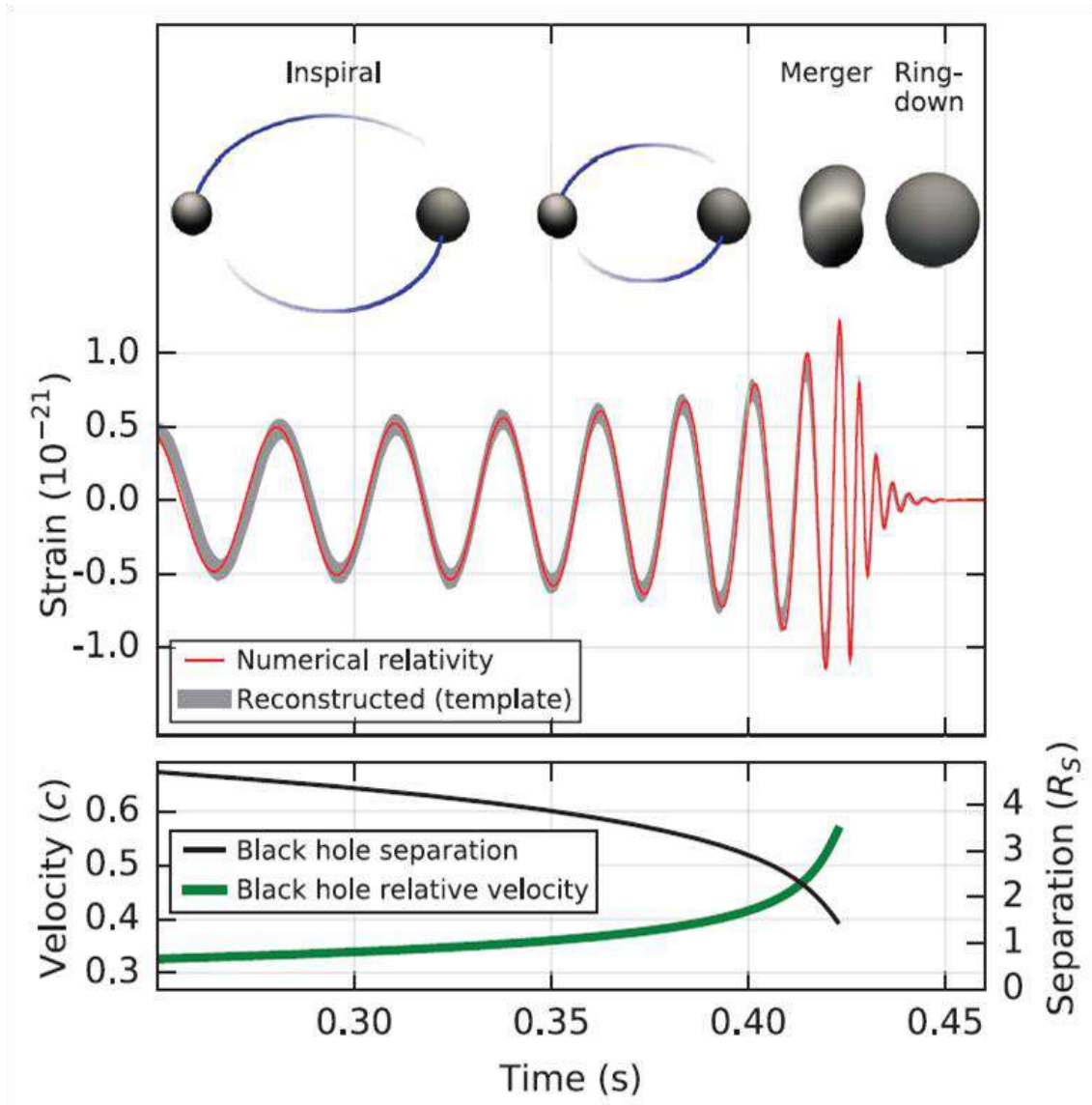
## 4.- Las detecciones

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 29 y 36 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.



Tras la primera detección del 14 de septiembre de 2015, LIGO detectó otros tres episodios, todos ellos 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

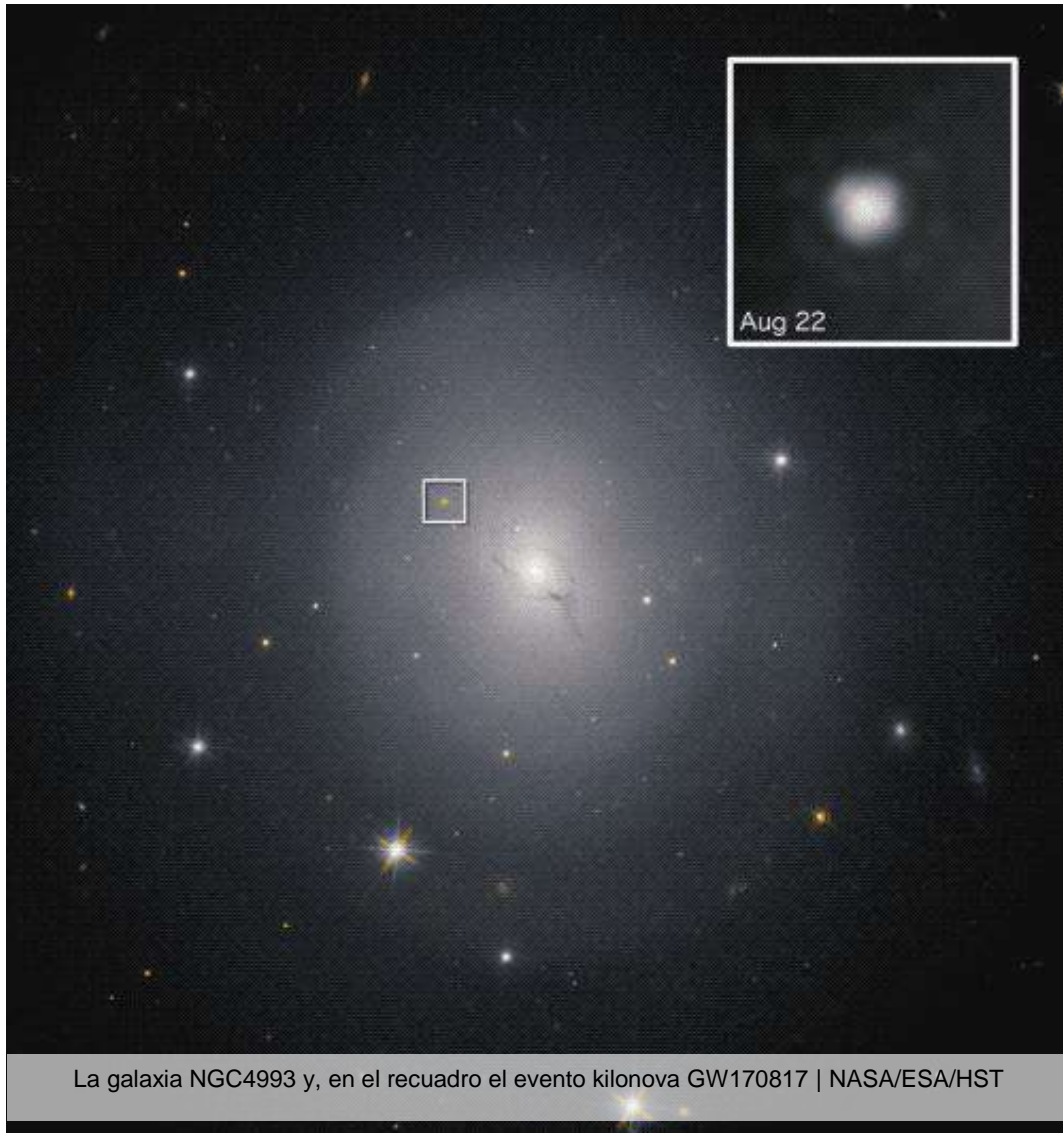
la LSC anunció la tercera detección de ondas gravitacionales, llamada GW170104, procedentes también del choque de dos agujeros negros, que se había producido el 4 de enero anterior. Estos tres descubrimientos fueron hechos públicos en la prestigiosa revista *Physical Review Letters*.



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.



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.

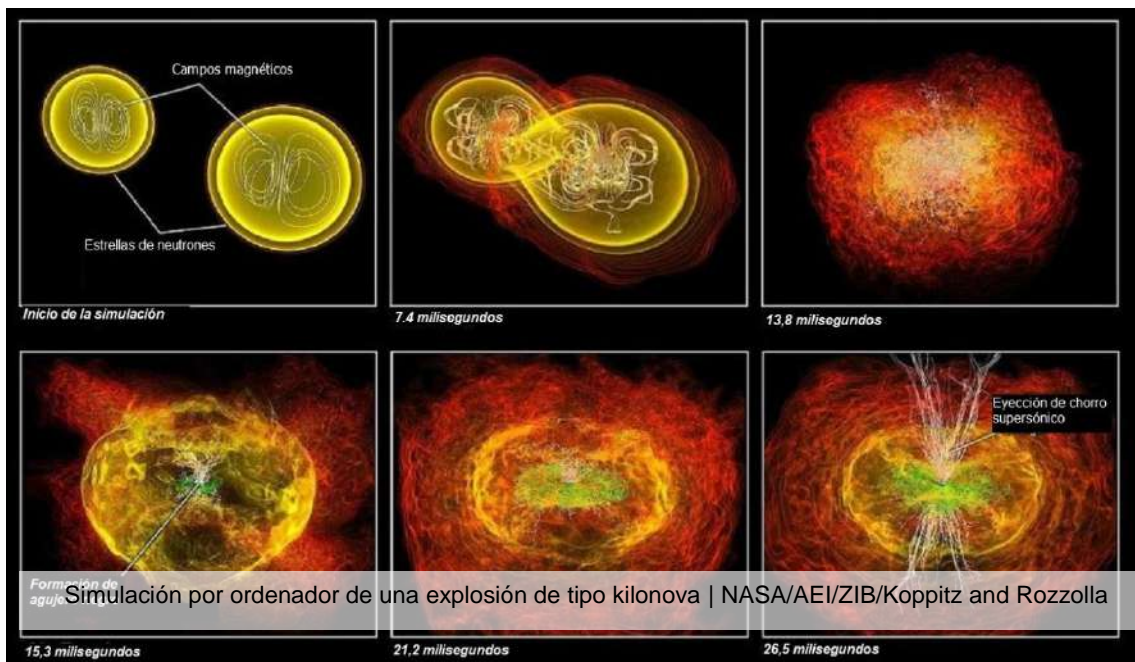
Docenas de artículos científicos fueron publicados el pasado 16 de octubre de 2017 en las revistas más prestigiosas del mundo (*Nature, Science, The Astrophysical Journal, Physical Review Letters,...*) dando cuenta del fenómeno GW170817. En el artículo que describe las observaciones de seguimiento tras el descubrimiento participan casi 4000 co-autores 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.

## **5.- 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 novae 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.

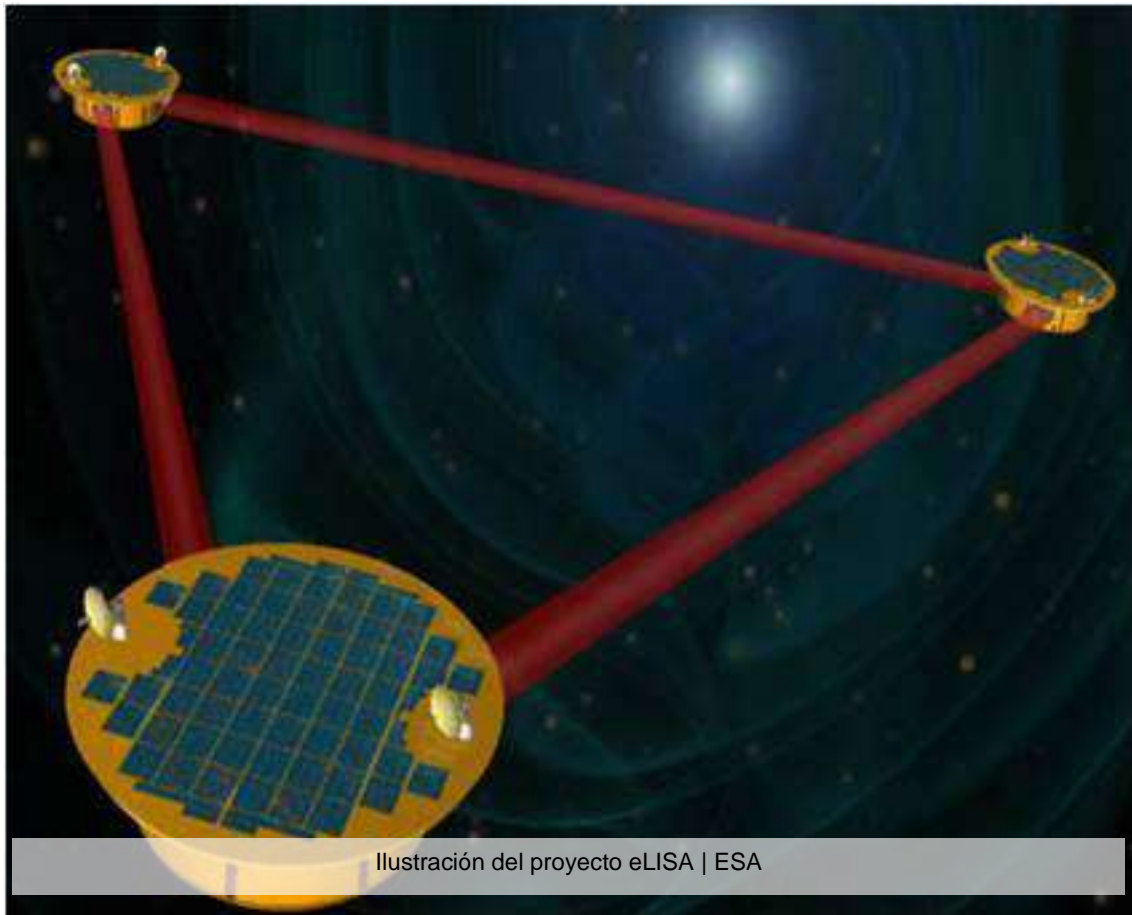


Como hemos indicado más arriba, tras la detección el 17 de agosto de 2017 de las ondas gravitacionales procedentes de la galaxia NGC4993, se realizaron múltiples observaciones de esta galaxia con los telescopios más potentes del mundo. Las observaciones espectroscópicas realizadas con los mayores telescopios 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.

## 6.- 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* (EEUU): 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.



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 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.

## **7.- 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’.



## 8.- Los Premios Princesa de Asturias y Nobel 2017

### El Premio Princesa de Asturias 2017

La Fundación Princesa de Asturias anunció en Oviedo el 14 de junio de 2017 que “Los físicos estadounidenses Rainer Weiss, Kip S. Thorne y Barry C. Barish y la Colaboración Científica LIGO han sido galardonados con el Premio Princesa de Asturias de Investigación Científica y Técnica 2017”. El jurado de este Premio estuvo presidido por Pedro Miguel Echenique Landiribar e integrado por Juan Luis Arsuaga Ferreras, Juan Ignacio Cirac Sasturáin, Miguel Delibes de Castro, Luis Fernández-Vega Sanz, Cristina Garmendia Mendizábal, Álvaro Giménez Cañete, Bernardo Hernández González, Clara Menéndez Santos, Sir Salvador Moncada, Ginés Morata Pérez, Enrique Moreno González, Teresa Rodrigo Anoro, Inés Rodríguez Hidalgo, Manuel Toharia Cortés y Santiago García Granda (secretario). La candidatura había sido propuesta por Emilio Méndez Pérez, Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica 1998. En esta edición concurrían un total de un total de 39 candidaturas procedentes de 17 países.



Weiss, Thorne, Barish y Laura Cadonati (LIGO) en la ceremonia de los Princesa de Asturias | Casa de S.M. el Rey

El jurado del Premio reconocía que los físicos Rainer Weiss, Kip S. Thorne y Ronald Drever (fallecido en marzo de 2017) fueron los que, en los años ochenta, propusieron la construcción del Observatorio de Interferometría Láser de Ondas Gravitacionales (LIGO) para la detección de ondas gravitacionales –ondulaciones en el tejido del espacio-tiempo–

predichas por Albert Einstein hacía un siglo en su teoría de la relatividad general. Como veremos en las biografías de los premiados, este observatorio estuvo dirigido entre 1997 y 2006 por el físico Barry C. Barish, que impulsó la fundación en 1997 de la Colaboración Científica LIGO, en la que se han integrado investigadores de universidades e instituciones de todo el mundo.

El jurado también reconoció que los detectores LIGO comenzaron a funcionar en 2002 y que trece años después, la Colaboración Científica LIGO anunció la primera detección de ondas gravitacionales procedentes de la colisión de dos agujeros negros de características desconocidas hasta ese momento, lo que supuso un hito en la historia de la física al confirmar la predicción de Einstein y marcó el inicio de un nuevo campo de la astronomía: la astronomía de ondas gravitacionales. Este descubrimiento también se consideró por el jurado como uno de los logros científicos más importantes del siglo al validar uno de los pilares de la física moderna –la teoría general de la relatividad– y abrir una nueva ventana para observar el Universo.

El 17 de octubre a las 11h, previamente a la ceremonia de entrega de los Premios, Rainer Weiss impartió una conferencia de divulgación sobre la historia de las ondas gravitacionales en el IES La Magdalena de Avilés, la conferencia fue dirigida a público infantil. El jueves 19 de octubre se celebró en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Oviedo una mesa redonda y encuentro con estudiantes en la que participaron Weiss, Thorne y Barish. La ceremonia de la entrega de los Premios se celebró en el Teatro Campoamor de Oviedo bajo la presidencia de SSMM los Reyes Felipe y Letizia el 20 de octubre de 2017.

### **El Premio Nobel 2017**

El día 3 de octubre de 2017, unos días antes de que tuviese la ceremonia de la entrega de premios Princesa de Asturias, el Profesor Göran K. Hansson, Secretario General de la Real Academia de Ciencias de Suecia anunciaba la concesión del Premio Nobel de Física 2017 a los físicos Rainer Weiss, Kip S. Thorne y Barry C. Barish. El Premio se dividía con una mitad para Weiss y la otra mitad compartida por Thorne y Barish. Inmediatamente tras el anuncio, la Profesora Olga Botner, miembro del Comité Nobel de Física, declaraba “Esperamos que las ondas gravitacionales nos den información sobre el universo oscuro”, un deseo bien fundamentado, pues el estudio de estas ondas puede aportar información preciosa sobre la física de los agujeros negros.

El 10 de diciembre de 2017, como cada año en esa fecha, durante una deslumbrante ceremonia en Estocolmo, se entregaron los Premios Nobel 2017 (salvo el de la Paz que tradicionalmente se entrega en Oslo). Para la ocasión, la Fundación Nobel dedicó meses de preparativos que culminaron en la llamada Semana Nobel, la previa al día de entrega, con los premiados ya en Suecia participando en actos diversos. Más de dos mil personas fueron

invitadas a la ceremonia final que tuvo lugar en el Palacio de Congresos de la capital sueca bajo la presidencia del rey Carlos Gustavo, quien entrega las medallas y diplomas a los premiados. Año tras año, se trata de la gran fiesta mundial de las letras y las ciencias.



Weiss, Barish y Thorne en la ceremonia de los Nobel | Pi Frisk/Nobel Media AB 2017

Para la entrega de los Nobel, se eligió la fecha del 10 de diciembre por conmemorar el fallecimiento de Alfred Nobel, el inventor de la dinamita y poseedor de 355 patentes, quien llegó a amasar esa inmensa fortuna con la que puso en marcha su Fundación. Aunque relacionado con los explosivos, Nobel fue un pacifista y hombre de letras, además de ingeniero. En el invento de la dinamita, a Alfred Nobel le debió mover la muerte accidental de su propio hermano Emil cuando manejaba nitroglicerina. La dinamita constituyó una gran innovación: al absorber la nitroglicerina en un material poroso se disminuían los riesgos en el manejo de los explosivos, facilitando su manejo y las operaciones para la detonación.

Vemos pues que las motivaciones de la invención de la dinamita y de la detección de ondas gravitacionales fueron de índole muy diferente. Sin embargo, como en el caso de la dinamita, la detección de ondas gravitacionales conlleva una gran dosis de innovación tecnológica. Las décadas de ingeniería invertidas en los observatorios gravitacionales han supuesto crear sistemas tecnológicos de altísima precisión en los que, por ejemplo, los mecanismos de aislamiento y de suspensión de los espejos protegen los experimentos de todas las perturbaciones imaginables, aunque sean mínimas, como las debidas a la agitación térmica de los átomos en los detectores, o a los microseísmos, por citar algunas. Naturalmente estos desarrollos tecnológicos son una dinamita innovadora que puede ser utilizada, ahora y en el

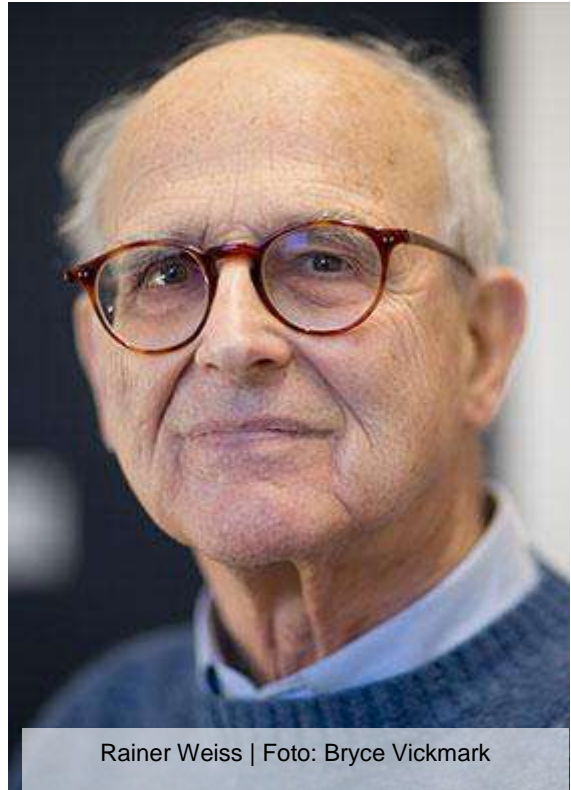
futuro, en muchísimas otras aplicaciones. La inversión en ciencia puede tardar décadas en dar sus frutos, pero nunca defrauda.

## 9.- Biografías de los Premiados

### Rainer Weiss

Rainer Weiss es un físico estadounidense (de origen alemán) y profesor emérito de física en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). Su contribución al descubrimiento de las ondas gravitacionales consistió en la invención y desarrollo de la técnica de interferometría láser, que es la operación básica de la colaboración científica LIGO. Fue además presidente del Grupo de Trabajo Científico del satélite COBE.

Rainer Weiss nació el 29 de septiembre de 1932 en Berlín, Alemania. Huyendo del gobierno nazi, su familia se trasladó primero a Praga a finales de 1932, y luego a los Estados Unidos, en 1938. Su juventud la pasó en Nueva York, donde asistió a la Escuela de Gramática de Columbia. Estudió en el MIT, donde se doctoró en 1962 con Jerrold Zacharias como director de tesis. Enseñó en la Universidad de Tufts en los años 1960-62 y fue becario postdoctoral en la Universidad de Princeton en los años 1962-64. Posteriormente en 1964 se incorporó como docente en el MIT.



Rainer Weiss | Foto: Bryce Vickmark

Weiss trajo dos campos de la investigación física fundamental desde el nacimiento hasta la madurez: la caracterización de la radiación cósmica de fondo, y la observación de ondas gravitacionales. Realizó medidas pioneras del espectro de la radiación cósmica de microondas, y fue co-fundador, además de asesor científico, del satélite COBE. Weiss también inventó el detector de ondas gravitacionales interferométricas, y co-fundó el proyecto NSF LIGO. En febrero de 2016 fue uno de los cuatro científicos que presentaron en conferencia de prensa el anuncio de la primera observación directa, en septiembre de 2015, de ondas gravitacionales.

Rainer Weiss ha sido premiado por sus contribuciones a la física en diversas ocasiones. En el 2006, con John C. Mather, él y el equipo de COBE recibieron el Premio Gruber en Cosmología. En el 2007, con Ronald Drever, fue galardonado con el Premio

Einstein por este mismo trabajo. Además del Princesa de Asturias y del Nobel 2017, por el logro de la detección de ondas gravitacionales, en 2016 recibió el Premio Especial de Innovación en Física Fundamenta y el Premio Harvey, junto con Kip Thorne y Ronald Drever. En el 2017 le fue otorgado el Premio Willis E. Lamb para Ciencia Láser y Óptica Cuántica.

## **Kip Thorne**

Kip Stephen Thorne es un físico teórico estadounidense que antes del Nobel ya era conocido por sus numerosas contribuciones en el campo de la física gravitacional y de la astrofísica, y por haber formado a toda una generación de científicos. Viejo amigo y colega de Stephen Hawking y Carl Sagan, ocupó la cátedra 'Profesor Feynman' de Física Teórica en el Instituto Tecnológico de California (CalTech) hasta 2009. Thorne es uno de los mayores expertos mundiales en las aplicaciones a la astrofísica de la Teoría de la Relatividad General de Albert Einstein.

Thorne nació en Logan, Utah, el 1 de junio de 1940. Hijo de los profesores de la Universidad de Utah D. Wynne Thorne y Alison C. Thorne, químico y economista, respectivamente, creció en un ambiente académico. Dos de sus cuatro hermanos también son profesores. Empezó a interesarse en la ciencia a la edad de ocho años, destacando en sus estudios desde temprana edad y llegando a convertirse en uno de los profesores más jóvenes de pleno derecho en la historia del Instituto de Tecnología de California. Recibió su título de grado (Bachelor of Science) en CalTech en 1962, y se doctoró por la Universidad de Princeton en 1965. Escribió su tesis de doctorado, *Geometrodynamics of Cylindrical Systems*, bajo la supervisión del físico relativista John Wheeler. Thorne volvió al Caltech como profesor asociado en 1967 y fue nombrado profesor de física teórica en 1970, profesor de la cátedra "William R. Kenan, Jr.", en 1981, y de la cátedra "Profesor Feynman de Física Teórica" en 1991. En junio de 2009 renunció a su cátedra Feynman (ahora es emérito) para desarrollar una carrera profesional como escritor y guionista cinematográfico. En su primer proyecto colaboró con el director Christopher Nolan en la película *Interstellar*.



A lo largo de los años, Thorne ha servido como mentor y tutor de tesis de muchos físicos teóricos de alto nivel que ahora trabajan en los aspectos de observación, experimentación y astrofísica de la relatividad general: aproximadamente cincuenta físicos han recibido títulos de doctorado en Caltech bajo la supervisión directa y personal de Thorne.

Thorne es conocido por su habilidad para transmitir la emoción y el significado de los descubrimientos sobre gravitación y astrofísica tanto en el plano profesional como en el divulgativo. Ha presentado diversos programas de la PBS estadounidense (televisión pública) y la BBC inglesa sobre temas como los agujeros negros, las ondas gravitatorias, la relatividad, el viaje en el tiempo y los agujeros de gusano.

Contrajo matrimonio en 1960 con Linda Jean Peterson. Tuvieron dos hijos: Kares Anne y Bret Carter, arquitecto. Thorne y Peterson se divorciaron en 1977. Thorne se casó por segunda vez en 1984 con Carolee Joyce Winstein, profesora de kinesiología y terapia física en la University of Southern California.

La investigación Thorne se ha centrado principalmente en la astrofísica relativista y la física de la gravitación, con énfasis en la evolución estelar, los agujeros negros y especialmente las ondas gravitatorias. Es conocido por el gran público por su controvertida teoría de que los agujeros de gusano pueden ser utilizados para viajar en el tiempo. Sin embargo, las contribuciones científicas de Thorne, que se centran en el carácter general del espacio-tiempo y la gravedad, cubren la gama completa de temas en relatividad general.

Thorne es considerado una de las pocas autoridades mundiales en ondas gravitatorias. Una buena parte de su carrera la consagró a la predicción sobre ondas gravitatorias y a la manera de observarlas desde la Tierra. Siempre fue un gran defensor del experimento LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory), en cuya fundación participó en 1984. Un aspecto significativo de su investigación es el desarrollo de las matemáticas necesarias para analizar los datos obtenidos con este observatorio. Thorne también ha llevado a cabo análisis de diseño de ingeniería para las características del LIGO que no se pudieron desarrollar cuando se concibió el experimento, y ha aportado asimismo los algoritmos necesarios para los análisis de datos a través de los cuales se efectúan las búsquedas de ondas.

Su contribución fue importante prestando apoyo teórico para la identificación de las fuentes de ondas gravitatorias en que LIGO debería centrarse, el diseño de los deflectores para el control de la luz dispersada en el haz de tubos de LIGO, y –en colaboración con el grupo de investigación de Vladimir Braginsky (Moscú, Rusia)– de los sistemas denominados Quantum Nondemolition (QND) measurement para preservar las mediciones de los detectores avanzados de ondas gravitatorias y los sistemas para reducir el ruido (Ruido de Johnson-Nyquist) en dichos detectores. Con Carlton M. Caves, Thorne desarrolló sistemas de

modulación de amplitud en cuadratura de osciladores armónicos, una técnica aplicable tanto en la detección de ondas gravitatorias como en óptica cuántica.

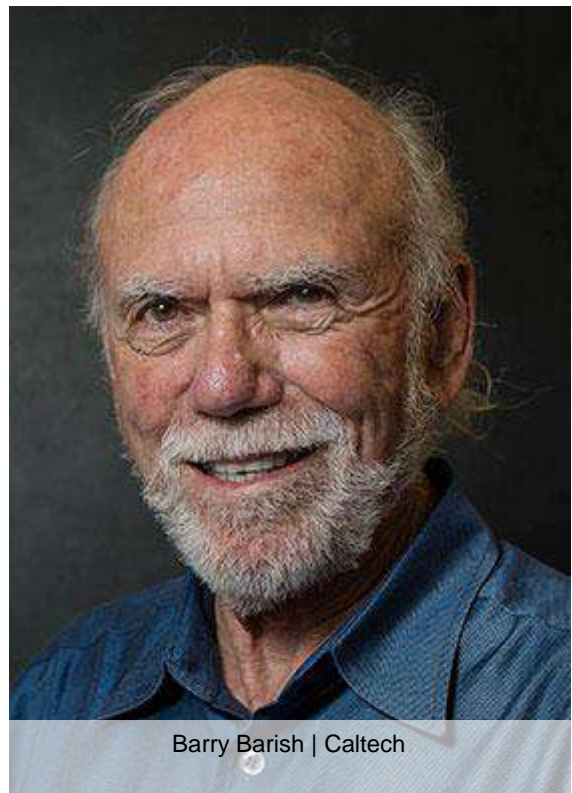
Thorne ha escrito y editado libros sobre temas de teoría de la gravedad y la astrofísica de alta energía. En 1973, fue co-autor del libro de texto clásico *Gravitation*, con Charles Misner y John Wheeler, en el que la mayor parte de la actual generación de científicos hemos estudiado la teoría de la relatividad general. En 1994, publicó *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, un libro de referencia para los no científicos por el que recibió numerosos premios. Este libro ha sido publicado en seis idiomas y está impreso en ediciones en varios idiomas incluyendo el español. Thorne ha publicado más de 150 artículos en revistas especializadas.

Además del Princesa de Asturias y del Nobel, Thorne ha recibido muchos otros galardones. Entre ellos, el Phi Beta Kappa de escritura científica, la Medalla Schwarzschild de la Sociedad Astronómica de Alemania, la Medalla Niels Bohr de la Unesco, la Medalla Einstein de la Sociedad Albert Einstein de Berna, el Premio Georges Lemaître y un largo etcétera.

## **Barry Barish**

Barry C. Barish es el físico experimental norteamericano que dirigió el observatorio LIGO entre 1997 y 2006 y quien impulsó la fundación en 1997 de la Colaboración Científica LIGO, en la que se han integrado investigadores de universidades e instituciones de todo el mundo.

Barish nació en Omaha, Nebraska, el 27 de enero de 1936. Sus padres fueron unos emigrantes judíos que llegaron a Los Ángeles justo después de la Segunda Guerra Mundial desde una parte de Polonia que se encuentra ahora integrada en Bielorrusia. En 1957 obtuvo el Grado de Física (B.A.) y en 1962 se doctoró en física de altas energías en la Universidad de California en Berkeley. Se unió al Instituto de Tecnología de California (CalTech) en 1963 como miembro de un equipo experimental que utilizaba los mayores aceleradores de partículas para sus investigaciones. Desde ese momento fue pasando sucesivamente por los puestos de Profesor asistente, Profesor



Barry Barish | Caltech

asociado, y Profesor de Física. Desde 1984 hasta 1996 fue el investigador principal del del Grupo de Física de Altas Energías de Caltech. En el período 1991-2005 ostentó el cargo de Profesor Linde de Física.

Los primeros experimentos de Barish fueron llevados a cabo en el Fermilab utilizando colisiones entre neutrinos de muy alta energía para revelar la estructura en quarks de los nucleones. Así se observó la corriente neutral débil que contribuyó a formalizar las teorías de unificación electrodébil de Glashow, Salam y Weinberg. En el año 1980 dirigió el experimento MACRO instalado en una cueva del Gran Sasso (Italia) ideado para la búsqueda de partículas exóticas como los monopolos magnéticos. También estudió allí las propiedades de los neutrinos. En los primeros años 1990, lideró el experimento GEM (Gammas, Electrones, Muones) para su inclusión en el Superconducting Super Collider, un proyecto que fue cancelado en 1993 por limitaciones presupuestarias.

Barish pasó a ser investigador principal de LIGO en 1994 y su director en 1997. En 1994 coordinó todos los esfuerzos que condujeron a la aprobación de su financiación por parte de la National Science Foundation (NSF). En 1997 creó la Colaboración Científica LIGO que cuenta hoy con más de 1000 colaboradores repartidos por todo el mundo y que tienen como misión la explotación científica de los resultados. La propuesta para incrementar las prestaciones de LIGO (Advanced LIGO) fue desarrollada mientras Barish era director. E incluso tras el término de su mandato en el año 2006 ha continuado jugando un papel muy destacado en el Observatorio. Tras la detección del evento del 14 de septiembre de 2015, fue Barish quien realizó la primera presentación de este descubrimiento a una audiencia de científicos reunidos en el CERN el 11 de febrero de 2016, presentación que se realizó de manera simultánea con el anuncio público.

Entre 2001 y 2002 Barish fue co-presidente del Panel Consultivo de Física de Altas Energías que elaboró una estrategia a largo plazo para el desarrollo de esta disciplina en EEUU. Entre muchos otros cargos en comités de muy alto nivel, también ocupó el de Director del esfuerzo global para el diseño del Colisionador Lineal Internacional (ILC), el proyecto más ambicioso del mundo en física de partículas que debe venir a complementar al LHC del CERN para explorar los rangos de energías de los TeV.

Barish está casado, tiene dos hijos, Stephanie Barish y Kenneth Barish, profesor y catedrático de Física y Astronomía en la Universidad de California en Riverside, y tres nietos.

Además del Princesa de Asturias y del Nobel de 2017, Barish ha recibido muchos otros premios y honores. En el 2002 recibió el Klopsteg Memorial Award de la Asociación Americana de Profesores de Física. En el Festival mundial de Física de 2016 fue designado como 'Titán de la Física'. En 2016 recibió el Premio Enrico Fermi, y en 2017 la Medalla Henry Draper de la Academia de Ciencias de EEUU, el Premio Giuseppe y Vanna Cocconi de la Sociedad Europea de Física y el Premio de Ciencia Fudan-Zhongzhi.



## **Otros Premios**

Señalaremos finalmente que previamente a la concesión del Princes de Asturias y del Nobel de Física, inmediatamente tras el hallazgo de las ondas gravitacionales, Ronald Drever, Kip Thorne y Rainer Weiss ya habían sido galardonados conjuntamente en 2016 con el Special Breakthrough Prize in Fundamental Physics (compartido con el equipo que firmó el artículo científico), el Gruber Prize in Cosmology (EE.UU.), el Shaw Prize in Astronomy (Hong Kong), el Smithsonian American Ingenuity Award in the Physical Sciences (compartido también con Barry C. Barish) y el Kavli Prize in Astrophysics, que conceden la Academia Noruega de Ciencias y Letras, la Fundación Kavli (Estados Unidos) y el Ministerio de Educación e Investigación de Noruega.

## **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](http://www.ligo.org)  
[www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu)  
[www.advancedligo.mit.edu](http://www.advancedligo.mit.edu)

[www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org)

*Hear the chirp/the sound of two black holes colliding*

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=1&v=egfBaUdnAyQ](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](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>