

## CHIRRIDOS CÓSMICOS

El 14 de septiembre de 2015, los detectores LIGO en los Estados Unidos detectaron, por primera vez, como el espacio vibraba con las ondas gravitacionales. Aunque la señal era muy débil cuando llegó a la Tierra, su detección constituyó toda una revolución en astrofísica. Las ondas gravitacionales son una forma totalmente nueva de detectar los acontecimientos más violentos en el espacio y ponen a prueba los límites de nuestro conocimiento.

Las ondas gravitacionales que se han observado fueron originadas en un colosal choque entre dos agujeros negros, hace más de 1000 millones de años. Albert Einstein, una vez más, tenía razón. Ha transcurrido un siglo desde que las ondas gravitacionales fueran predichas por su teoría de la relatividad general, pero él siempre había dudado de que pudieran ser detectadas.



**Figura 1.** La primera onda gravitacional detectada

LIGO, el **Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory**, es un proyecto colaborativo con más de mil investigadores de más de veinte países que han trabajado juntos durante más de cincuenta años. Los premios Nobel de 2017 han sido, con su entusiasmo y determinación, personas imprescindibles para el éxito de LIGO. Los pioneros **Rainer Weiss** y **Kip S. Thorne**, junto con **Barry C. Barish**, el científico y líder que condujo el proyecto a su culminación, han hecho posible que más de cuatro décadas de esfuerzo hayan logrado que, finalmente, las ondas gravitacionales hayan sido observadas.

Los rumores comenzaron a circular unos cinco meses antes de que el grupo de investigación internacional hubiera finalizado la revisión de sus cálculos, pero no se atrevieron a anunciar sus descubrimientos hasta el 11 de febrero de 2016. Los investigadores del LIGO lograron varios récords con su primer descubrimiento; además de conseguir observar por primera vez las ondas gravitacionales, constataron que en el espacio existen agujeros negros de tamaño medio (de entre 30 y 60 masas solares) que pueden fusionarse. Por un instante, la radiación gravitacional procedente de la colisión de los agujeros negros que colisionan fue mucho más intensa que la totalidad de la luz de todas las estrellas visibles del universo.

### Vibraciones en el espacio tiempo

La oscuridad era muy grande, pero no completa. Los temblores procedentes de dos agujeros negros que chocan sacudieron el espacio-tiempo. Como las ondas de una piedra lanzada al agua, las ondas gravitacionales del impacto se extendieron por todo el cosmos. Tuvo que pasar un tiempo para que llegaran hasta nosotros. A pesar de moverse lo más rápido posible (a la velocidad de la luz), transcurrieron más de 1000 millones de años para estas ondas llegar a la Tierra. El 14 de septiembre de 2015, a las 11.51 CET (Central European Time), un suave temblor en el patrón de luz en los laboratorios LIGO de Estados Unidos reveló el drama que se desarrolló hace tiempo a 1300 millones de años luz de la Tierra.

LIGO no es ningún telescopio normal para detectar la luz y otras radiaciones electromagnéticas procedentes del espacio. Es un instrumento para escuchar las ondas gravitacionales; aunque las ondas gravitacionales son vibraciones del espacio-tiempo, no ondas sonoras, su frecuencia es equivalente a las que podemos escuchar.

Durante décadas los físicos han tratado de detectar estas ondas gravitacionales que sacuden el universo, tal como Albert Einstein predijo hace cien años. Einstein explicó que el espacio y el tiempo son deformables, y que el espacio-tiempo cuatridimensional vibra con las ondas gravitacionales originadas cuando una masa acelera (como cuando una patinadora hace piruetas), cuando una estrella explota en una galaxia lejana o cuando un par de agujeros negros giran uno alrededor del otro.

Como las ondas gravitacionales, los agujeros negros también habían sido predichos por la teoría general de la relatividad de Einstein de 1915. Durante más de cincuenta años la mayoría de los investigadores estaban convencidos de que los agujeros negros eran soluciones teóricas a las ecuaciones de Einstein, pero que no

existían realmente en el espacio. La teoría de la relatividad explica la gravedad como una curvatura del espacio-tiempo. Donde la gravedad es extremadamente fuerte, la curvatura puede llegar a ser tan grande que forma un agujero negro. Los agujeros negros son los objetos más extraños en espacio-tiempo. Nada puede escapar de ellos, ni siquiera la luz. Son, por tanto, un auténtico misterio para la física.

Las ondas gravitacionales nos brindan la posibilidad de observar algo antes impensado, pero durante mucho tiempo no estuvo claro que se pudieran resolver los misterios del espacio-tiempo. Durante años, Albert Einstein estuvo convencido de que nunca sería posible medir las ondas gravitacionales y no estaba seguro de si eran reales o solo una ilusión matemática. Su contemporáneo, Arthur Eddington, fue más escéptico cuando comentó que las ondas gravitacionales parece que se "propagan a la velocidad del pensamiento".

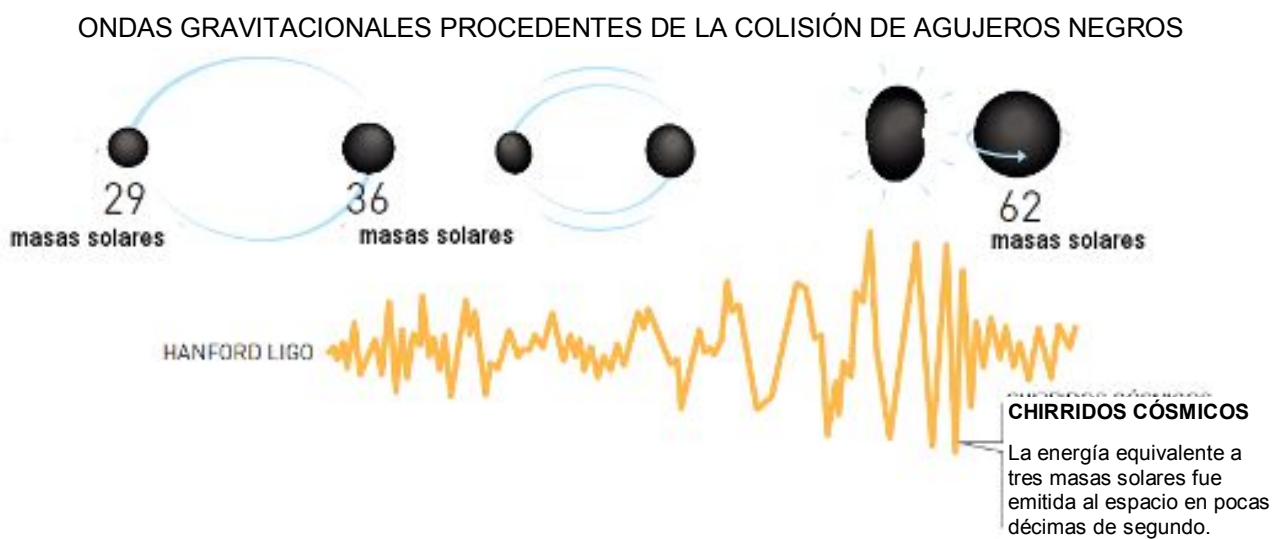
La existencia de ondas gravitacionales se empezó a aceptar a finales de la década de 1950, cuando nuevos cálculos demostraron que al transportar energía deberían de ser, en principio, medibles. Una evidencia indirecta se produjo en la década de 1970, cuando los astrónomos estadounidenses Joseph Taylor y Russell Huls utilizaron un gran radiotelescopio para observar un par de estrellas muy densas, un pulsar doble, y demostraron que las estrellas, al girar una alrededor de la otra aumentan su velocidad, al mismo tiempo que pierden energía, acercándose entre sí. La cantidad de energía perdida se correspondía con la que los cálculos teóricos predecían para las ondas gravitatorias. Joseph Taylor y Russell Hulse recibieron el Premio Nobel de Física en 1993.

Sin embargo, la evidencia directa de ondas gravitacionales requiere su observación. Pero el espacio tiempo es rígido y no es fácil de deformar, por lo que sólo los más violentos procesos cósmicos pueden causar ondas gravitacionales suficientemente grandes para ser medidas. Su amplitud, no obstante, es muy pequeña. Detectarlas es equivalente a medir la distancia a una estrella situada a diez años luz con una precisión equivalente al diámetro de un cabello. Además, incluso si el universo entero estuviera vibrando constantemente con las ondas gravitacionales, los acontecimientos más explosivos ocurren raramente en nuestra galaxia. Había que buscar más lejos.

### Las ondas gravitacionales nos revelan el pasado

Por fin ha sucedido, las ondas gravitacionales han caído en la rampa de LIGO. Dos agujeros negros que habían colisionado en los inicios del universo han terminado moviéndose en círculos uno alrededor del otro. En cada ciclo, la perturbación producida en el espacio-tiempo, se propaga por el espacio en forma de ondas gravitacionales

Las ondas transportan energía que restan a los agujeros, provocando que se acerquen uno al otro. Su movimiento espiral implica que los agujeros roten cada vez más rápido enviando más y más energía al espacio en una especie de danza acelerada que dura millones de años. Al final, en una fracción de segundo, los horizontes de los agujeros negros se encontraron, precipitándose hacia su fatídico final a casi la velocidad de la luz. Las ondas gravitacionales cesaron de producirse dejando tras de sí un agujero negro sin ningún rastro visible de su dramático nacimiento.



**Figura 2.** Los dos agujeros negros emitieron ondas gravitatorias durante millones de años mientras giraban uno alrededor del otro. Fueron acercándose más y más, antes de fusionarse para convertirse en un agujero negro en unas pocas décimas de segundo. Las ondas alcanzaron entonces un máximo que para nosotros, situados a 1300 millones de años luz de distancia, suenan como chirridos cósmicos que cesaron abruptamente.

Pero el recuerdo de esta fusión no se ha perdido completamente, su historia permanece en las ondulaciones del espacio-tiempo. Las ondas gravitatorias que rítmicamente expanden y contraen el espacio, cambian de tono a medida que lo hace el mensaje que portan. Si pudiéramos escuchar todas las ondas, y no sólo las más fuertes, el universo se llenaría de música, como pájaros cantando en un bosque, con un tono fuerte aquí y otro más débil allí. Después de miles de millones de años, a medida que el dúo de agujeros negros se acelera hacia su colisión final, hay un crescendo antes de que los tonos se desvanezcan en el silencio.

Sólo se pueden escuchar unos pocos chirridos en el espacio. ¿Por qué son tan débiles? Esto se debe a que su fuente estaba muy lejos y las ondas gravitatorias, como las ondas de luz, se debilitan con la distancia. Así que cuando las ondas gravitacionales llegan aquí, su intensidad ha disminuido significativamente. El estiramiento en el entramado espacio-tiempo que el detector de LIGO detectó cuando la onda atravesó la Tierra era millares de veces más pequeño que un núcleo atómico.

## **LIGO un gigantesco interferómetro**

Fue un sueño durante más de cincuenta años, y el camino al éxito fue largo, sinuoso y a veces difícil para muchos de los investigadores involucrados. Uno de los primeros detectores para capturar las ondas gravitacionales se parecía a un diapasón, sensible a las ondas de una frecuencia particular. Pero Joseph Weber, de la Universidad de Maryland en Washington, sólo podía intuir la frecuencia en la que los agujeros negros emitirán su canto de cisne. Él construyó el primer detector en los años 60, pero entonces mucha gente dudaba que las ondas gravitacionales, e incluso los agujeros negros, existieran. Así que causó sensación cuando, en la década de 1970, afirmó haber escuchado los tonos esperados. Sin embargo, nadie fue capaz de repetir los resultados de Weber y sus observaciones fueron consideradas falsas alarmas.

A mediados de los años setenta, a pesar del escepticismo generalizado, tanto **Kip Thorne** como **Rainer Weiss** estaban francamente convencidos de que las ondas gravitacionales podían ser detectadas y producir una revolución en nuestro conocimiento del universo. Rainer Weiss ya había analizado posibles fuentes de ruido de fondo que perturbaban sus mediciones. También había diseñado un detector, un interferómetro láser, que superaría este ruido.

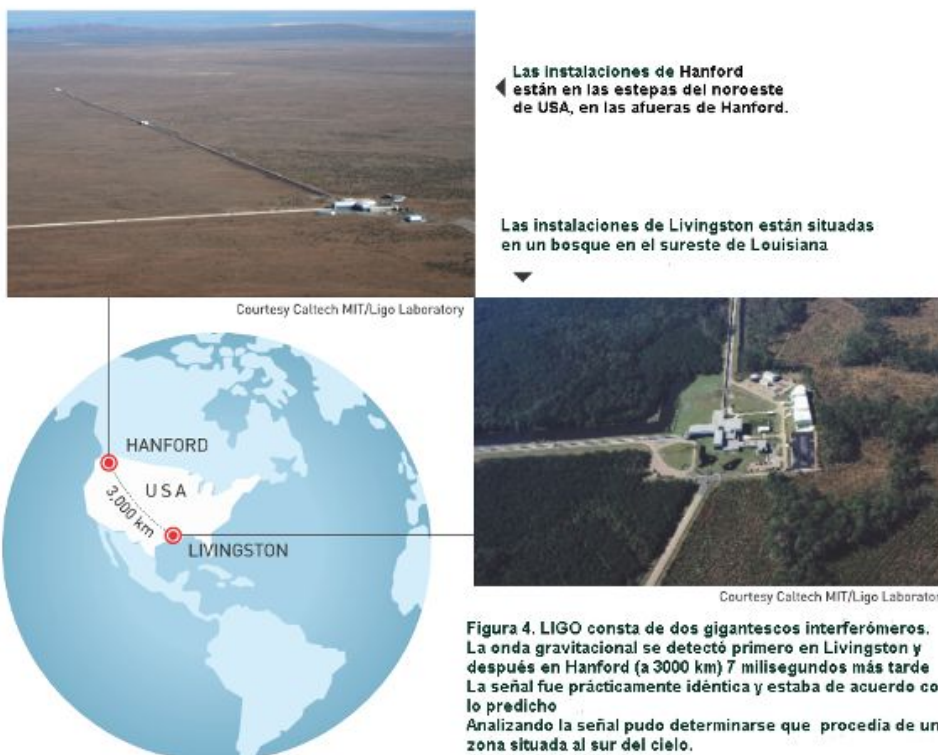
Mientras Rainer Weiss desarrollaba sus detectores en el MIT (Cambridge), fuera de Boston, Kip Thorne también comenzó a trabajar con Ronald Drever, quien construyó sus primeros prototipos en Glasgow, Escocia. Drever finalmente se trasladó al Caltech en Los Ángeles para unirse a Thorne. Weiss, Thorne y Drever formaron un trío que fue pionero durante muchos años. Drever últimamente no estaba en primera línea del proyecto, pero pudo conocer el descubrimiento antes de morir en su casa de Escocia en marzo de 2017.

En lugar del diseño de la horquilla de Weber, Weiss, Thorne y Drever desarrollaron otro instrumento, un interferómetro basado en un láser. El principio se conoce hace mucho tiempo: un interferómetro consta de dos brazos que forman una L. En los extremos de la L, se colocan unos espejos que reflejan las ondas incidentes. Una onda gravitatoria afectará los brazos del interferómetro de manera diferente modificando su longitud.

Un rayo láser que rebote entre los espejos puede detectar el cambio en las longitudes de los brazos. Si no ocurre nada, los rayos de luz del láser se cancelan mutuamente cuando se reencuentran en el vértice de la L. Sin embargo, si cualquiera de los brazos del interferómetro cambia de longitud, la luz viaja distancias diferentes, por lo que las ondas luminosas se desfasan produciendo un patrón de interferencia donde los haces se encuentran.



**Figura 3.** Cómo capturar una onda gravitacional. La primera onda gravitacional detectada en el mundo fue creada en una violenta colisión entre dos agujeros negros hace 1300 millones de años. Cuando estas ondas atravesaron la Tierra, 1300 millones de años después, se habían debilitado considerablemente. La distorsión en el espacio-tiempo que el LIGO midió era miles de veces más pequeña que un núcleo atómico.



La idea era bastante simple, pero el diablo estaba en los detalles, así que se tardó más de cuarenta años en llevarla a cabo. Se requieren instrumentos a gran escala para medir cambios microscópicos de longitudes menores que el núcleo de un átomo. El plan consistía en construir dos interferómetros, cada uno con brazos de cuatro kilómetros de longitud, a lo largo de los cuales el haz láser rebotaría muchas veces, extendiendo así el camino de la luz y aumentando la posibilidad de detectar pequeños contracciones en el espacio-tiempo. LIGO se encuentra en las estepas del noroeste de Estados Unidos, en las afueras de Hanford, Washington, con una instalación gemela a tres mil kilómetros al sur, en los pantanos de Livingston, Louisiana.

Se necesitaron años para desarrollar un instrumento con la suficiente sensibilidad para distinguir las ondas gravitacionales del ruido de fondo. Esto requería un análisis sofisticado y una teoría avanzada, en la cual **Kip Thorne** era el experto. Pero los más altos niveles de ingeniería creativa y destreza son necesarios para construir instrumentos ingeniosos, y esta fue la contribución pionera de **Rainer Weiss**. La longitud de onda e intensidad de la luz láser debe ser lo más estable posible, y el haz debe golpear los espejos suspendidos con precisión. No deben temblar en absoluto, ni siquiera cuando las hojas caen de los árboles cercanos, un niño corre o un camión pasa por un camino lejano. Al mismo tiempo, estos espejos colgantes deben estar libres para oscilar con el paso de las ondas gravitatorias. El movimiento térmico de los átomos en la superficie de los espejos debe ser compensado, así como los efectos cuánticos en el láser. Era necesario desarrollar nueva tecnología láser e inventar nuevos materiales, así como construir gigantescos tubos de vacío, aislamiento sísmico y otras tecnologías vitales mucho más allá de lo que se había logrado anteriormente.

La ejecución de este proyecto a pequeña escala ya no era posible y se necesitaba un nuevo enfoque. En 1994, cuando **Barry Barish** asumió el liderazgo de LIGO, transformó el pequeño grupo de investigación de unas 40 personas en una colaboración internacional a gran escala con más de un millar de participantes. Buscó la experiencia necesaria y reunió a numerosos grupos de investigación de muchos países. El sueño imposible sólo podía hacerse realidad a través de los esfuerzos colaborativos de la gran ciencia.

### La señal llegó inmediatamente

En septiembre de 2015, LIGO estaba a punto de empezar de nuevo después de una actualización que había durado varios años. Equipado ahora con láseres más potentes y diez veces más grandes, espejos de 40 kilos, filtros de ruidos muy avanzados y uno de los sistemas de vacío más grandes del mundo, capturó una señal de onda unos días antes de comenzar el experimento. La onda pasó por Livingston y luego, 7 milisegundos más tarde, moviéndose a la velocidad de la luz, apareció en Hanford, a tres mil kilómetros de distancia.

Un mensaje del sistema informático fue enviado temprano en la mañana del 14 de septiembre de 2015. Todos en Estados Unidos estaban durmiendo, pero en Hannover en Alemania eran las 11:51 y Marco Drago, un joven físico del Instituto Max Planck de Física Gravitacional, se estaba preparando para el almuerzo. Las curvas que vislumbró se parecían exactamente a las que se habían previsto. ¿Podría realmente ser la primera persona en el mundo en ver las ondas gravitatorias? ¿O era sólo una falsa alarma, una de las pruebas ciegas ocasionales que solo unas pocas personas conocían?

La forma de la onda era exactamente como se predijo, y no era una prueba. Todo encajaba perfectamente. Los pioneros, ahora de 80 años, y sus colegas de LIGO podían escuchar la música con la que tanto habían soñado, como un glissando, o un pájaro cantando su solitaria canción. Era casi demasiado bueno para ser cierto, pero hasta febrero del año siguiente no se les permitió revelar la noticia a nadie, incluidas sus familias.

El secreto bien guardado, llamado **GW 150914**, cumplió todas las expectativas. A partir de la señal, los investigadores pudieron averiguar que los agujeros negros eran 29 y 36 veces más pesados que el Sol, pero con un diámetro máximo de 200 kilómetros. Se fusionaron para formar un agujero negro de alrededor de 62 masas solares, de modo que durante unas pocas décimas de segundo pudieron irradiar energía en forma de ondas gravitatorias equivalente a tres masas solares. Esto hizo de GW 150914 el objeto radiante más poderoso en el universo durante ese breve momento. La señal también indica el área en los cielos meridionales donde ocurrió el acontecimiento violento: a 1300 millones de años luz de distancia. Esto significa que la colisión ocurrió hace 1300 millones de años, en el momento en que la vida en la Tierra estaba pasando de los organismos unicelulares a organismos multicelulares.

LIGO ha detectado otros dos eventos similares desde el primer descubrimiento. Su instalación hermana europea, VIRGO, en las afueras de Pisa en Italia, se unió a LIGO en agosto de 2017 y anunciaron su primer descubrimiento el 27 de septiembre. Los tres detectores observaron las mismas ondas gravitacionales cósmicas el 14 de agosto de 2017; provenían de dos agujeros negros de tamaño mediano que chocaron hace 1800 millones de años.

Los detectores han visto el universo temblar cuatro veces y se esperan muchos más descubrimientos. India y Japón también están construyendo nuevos observatorios de ondas gravitatorias. Con varios experimentos localizados muy separados, los investigadores deben ser capaces de identificar con precisión de dónde vienen las señales. Las ondas gravitacionales observadas podrán entonces ser seguidas usando telescopios ópticos, telescopios de rayos X u otros tipos de telescopios.

Hasta el momento, todo tipo de radiación electromagnética y partículas, como los rayos cósmicos o los neutrinos, nos han dado conocimiento sobre el universo. Las ondas gravitatorias, sin embargo, son un testimonio directo de las perturbaciones en el espacio-tiempo mismo. Esto es algo completamente nuevo y diferente, que nos da acceso a mundos nunca antes visitados. Una gran cantidad de descubrimientos aguarda a aquellos que logren captar las ondas gravitacionales e interpreten su mensaje.

## LINKS AND FURTHER READING

Additional information on this year's prizes, including a scientific background in English, is available on the website of the Royal Swedish Academy of Sciences, [www.kva.se](http://www.kva.se), and at <http://nobelprize.org>. There you can watch video footage of the press conferences, the Nobel Lectures and more. Information on exhibitions and activities related to the Nobel Prizes and the Prize in Economic Sciences is available at [www.nobelmuseum.se](http://www.nobelmuseum.se).

### LIGO websites

[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)

### Books

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

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

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

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

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

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

### Videos

#### 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>

### Scientific article

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

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2017

With one half to	and the other half jointly to	
<p><b>RAINER WEISS</b></p> <p>Born 1932 in Berlin, Germany.</p> <p>Ph.D. 1962 from the Massachusetts Institute of Technology, MIT, Cambridge, MA, USA.</p> <p>Professor of Physics, Massachusetts Institute of Technology, MIT, Cambridge, MA, USA</p> <p><a href="http://web.mit.edu/physics/people/faculty/weiss_rainer.html">http://web.mit.edu/physics/people/faculty/weiss_rainer.html</a></p>	<p><b>BARRY C. BARISH</b></p> <p>Born 1936 in Omaha, NE, USA.</p> <p>Ph.D. 1962 from the University of California, Berkeley, CA, USA.</p> <p>Linde Professor of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA.</p> <p><a href="https://labcit.ligo.caltech.edu/~BCBAct">https://labcit.ligo.caltech.edu/~BCBAct</a></p>	<p><b>KIP S. THORNE</b></p> <p>Born 1940 in Logan, UT, USA.</p> <p>Ph.D. 1965 from Princeton University, NJ, USA.</p> <p>Feynman Professor of Theoretical Physics, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA</p> <p><a href="https://www.its.caltech.edu/~kip/index.html/">https://www.its.caltech.edu/~kip/index.html/</a></p>