

ONDAS GRAVITACIONALES

# El triunfo de una idea

Cómo es el observatorio de ondas gravitacionales LIGO, el instrumento más sensible en la historia de la astronomía, que rinde homenaje a Albert Einstein.

Por **Ángela Posada-Swofford**

FOTOGRAFÍA: JOSÉ ANTONIO DÍAZ DE LEÓN



**H**ace más de 10 años, cuando la física gravitacional no asomaba a la luz pública, recibí una exótica invitación del Instituto Tecnológico de Massachusetts para visitar el lugar donde se acababa de instalar una nueva generación de instrumentos con los cuales explorar el Universo de maneras radicalmente diferentes, como es el uso de la gravedad en lugar de la luz. El Observatorio Avanzado de Interferometría Láser de Ondas Gravitacionales (LIGO), en medio de un antiguo complejo nuclear del gobierno estadounidense en el estado de Washington, reflexionaba por primera vez el poder de detección de sus dos largos brazos en forma de L.

¿Qué pasaría si pudiéramos escuchar el cielo?, nos había preguntado entonces, al puñado de visitantes, el profesor de física del MIT Rainer Weiss, quien durante décadas trabajó contra viento y marea en la creación de la tecnología del LIGO.

¿Qué, si en lugar de usar la luz visible, la infrarroja, la ultravioleta, la de rayos X, la gamma o el radio, el Universo tuviera otro modo de comunicarse con nosotros, uno que pudiera penetrar hasta los confines sin los impedimentos típicos de la escala electromagnética? ¿Por qué no palpar la naturaleza del espacio-tiempo concebido por Albert Einstein, que puede pensarse como una fibra de caucho flexible que se deprime bajo el peso de los objetos celestes, causando el efecto de la gravedad? Si esa fibra se estira y encoje cada vez que es agitada por una catástrofe en otro lado del Universo, ¿por qué no intentar detectar esas vibraciones? Y de hallarlas, ¿por qué no conferirles una dimensión auditiva, pues su frecuencia cae dentro de este rango?

**Casi todo lo que sabemos del Universo lo hemos aprendido a través del electromagnetismo: la luz.**

# Preguntas para una Onda gravitacional

**E**n un momento dado, cuando LIGO luchaba a brazo partido por obtener fondos de investigación a comienzos de los años 90, su oponente principal era la misma comunidad de astrónomos porque no veían la utilidad de este fenómeno. Ahora las ondas gravitacionales son el nuevo amor de la cosmología moderna. Hasta les han compuesto odas literarias. Pero aislarlas del ruido que las rodea, es como intentar escuchar un violín en medio de una calle llena de tráfico. Para eso, los expertos comparan la señal con otras generadas por computadora. Según físicos a través de varias publicaciones científicas, las siguientes son algunas de las preguntas que esta nueva forma de astronomía podría contestar:

**¿Qué información podemos sacar de una onda gravitacional?**

Las ondas de gravedad emitidas por objetos binarios que se unen en uno solo (estrellas de neutrones, agujeros negros, o el combo: una estrella de neutrones orbitando alrededor de un hoyo negro) nos llegan débilmente, pero tienen impresa un mundo de información acerca de esos sistemas hasta ahora inescrutables, como por ejemplo la masa de los objetos involucrados, la rapidez con la que rotan alrededor de sus ejes, la ubicación de ese sistema binario en el cielo y su distancia de la Tierra.

**¿Son todas las ondas iguales?**

En absoluto. Las características de cada pulso de ondas dependen del fenómeno que las haya causado. Por ejemplo, las emitidas por dos objetos binarios que se unen para formar uno mayor son ondas altamente estructuradas. A medida que disminuye el radio de la órbita en los dos objetos celestes, aumenta la frecuencia de su onda gravitacional, de tal manera que la frecuencia de la señal se incrementa a medida que progresa la unión de los objetos. A esto los físicos llaman "señal chirp", y en el caso de la onda gravitacional GW150914, detectada por LIGO, es el sonido de ¡whooooo! que termina abruptamente en Do. En cambio, los científicos sospechan que el chirp de dos estrellas de neutrones, que giran increíblemente rápido (hasta más de 700 veces por segundo), produciría una nota musical

más alta. Y las ondas producto del Big Bang podrían ser un patrón continuo y uniforme.

Los damos por sentado, pero ¿existen inequívocamente los agujeros negros? Los astrónomos han visto las estrellas y el gas sucumbir en su viaje hacia ese infierno, sin embargo no se han observado por sí mismos. Pero un objeto tan extremo, que más que causar una depresión en el espacio-tiempo es como un pozo sin fondo, es algo que necesita evidencia. Hay que poner el dedo en la llaga. La señal de LIGO habría proporcionado esa evidencia, confirmando también que la unión de dos de estos hoyos procede tal como se había predicho.

**¿Viajan estas ondas a la velocidad de la luz?**

Los científicos se hallan ahora comparando las observaciones de LIGO con las de otros tipos de telescopios, para saber si las señales llegan al mismo tiempo. La tesis de los físicos es que la gravedad es transmitida por partículas elementales hipotéticas llamadas gravitones, el equivalente en gravedad de los fotones. Si, al igual que los fotones, estas partículas no tienen masa, entonces las ondas gravitacionales viajarían a la velocidad de la luz, tal como predice la relatividad general.

Pero si tienen algo de masa, las ondas viajarían un poco más lento. Que un gravitón exista, y que tenga masa, podría tener implicaciones profundas en la física fundamental. La razón es que un gravitón con masa la habría adquirido tragando mucha energía oscura, y dejando una poca apenas para causar la fuerza repulsiva que está acelerando al Universo hacia fuera. Entonces la glotona partícula tendría las claves de uno de los mayores misterios de la cosmología.

**¿Qué nos puede decir una onda gravitacional sobre los pulsos de rayos gamma?**

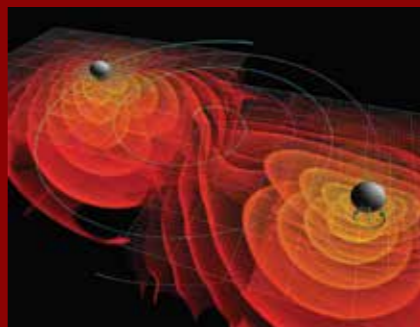
Nos puede decir si estos rayos se producen a partir de la colisión de dos estrellas de neutrones. Los estallidos de rayos gamma, al igual que las estrellas de neutrones, están entre los fenómenos menos entendidos. Los rayos gamma duran unos pocos segundos o minutos, y la teoría es que nacen a partir de explosiones de hipernovas de enorme potencia, que dejan tras ellas agujeros negros masivos. Es como si los rayos gamma fueran agujeros negros monstruosos en formación. Verlos brotar de otras fuentes, como las estrellas de neutrones en colisión, usando varios detectores de ondas gravitacionales simultáneamente, permitiría identificar ese sistema de origen.

**¿Son grumosas las estrellas de neutrones?**

Estos objetos geniales son los restos de estrellas grandes que se colapsaron bajo su propio peso, convirtiéndose en algo imposiblemente denso. Su física extrema no se entiende muy bien, y por eso las ondas gravitacionales podrían aclarar algo de ella. Por ejemplo, la intensa gravedad de su superficie por lo general hace que una estrella de neutrones sea perfectamente esférica. Pero se piensa que algunas podrían tener ligeros defectos en su superficie, 'montañas' de unos pocos milímetros de altura, suficientes para alterar su simetría. Esa alteración es suficiente para que la estrella, que gira violentamente rápido, deforme el espacio tiempo a su alrededor, produciendo una onda gravitacional continua y llena de información.

**¿Cómo encajan las cuerdas cósmicas?**

Un descubrimiento aún más estrambótico e interesante sucedería si se detectan ondas gravitacionales emanando de "cuerdas cósmicas". Éstas son defectos hipotéticos en la curvatura del espacio-tiempo, que podrían estar o no estar relacionadas con la teoría de cuerdas. Podrían pensarse como tubos extremadamente delgados que se extienden como patas de medusa por distancias cósmicas. Los investigadores predicen que, de existir, estas tiras de espacio-tiempo podrían tener nudos o dobleces; y que si una de ellas se rompe, liberaría un pulso de ondas gravitacionales.



Dos estrellas de neutrones pueden también 'bailar el tango del matrimonio', y sus instantes finales serían dramáticos y variados. Por ejemplo, el objeto resultante podría ser una enorme estrella de neutrones, o colapsar de inmediato y convertirse en un agujero negro.

**¿Qué hace que exploten las estrellas?**

Las simulaciones de las supernovas tipo II no acaban de explicar qué causa la ignición de estas criaturas. Escuchar las ondas gravitacionales producidas por estas explosiones debería ayudar. Especialmente si la explosión es asimétrica, no balanceada, porque entonces produciría ondas desordenadas que se puedan detectar más fácilmente, y comparar con lo que se ha visto en telescopios electromagnéticos.

**¿Cuán rápidamente se está expandiendo el Universo?**

Si varios detectores de ondas gravitacionales en varias partes del mundo detectan señales de una misma unión de estrellas de neutrones, podrán calcular el volumen absoluto de la señal y eso revelará qué tan lejos ocurrió el suceso. También podrán calcular la dirección de la cual proviene la señal, permitiendo a los astrónomos deducir en qué galaxia vivían las estrellas. Comparando la velocidad a la que se aleja de nosotros la galaxia en cuestión con la distancia de la estrella, las ondas gravitacionales podrían dar un cálculo de la tasa de la expansión cósmica que pueda complementar los métodos actuales.

En otras palabras, ¿por qué no darle oídos biónicos a la astronomía, para escuchar lo que el Universo trata de decirnos, y que la escritora Marcia Bartusiak llamara acertadamente "sinfonía inacabada de Einstein"?

En febrero de 2016, cuando el mundo recibió la noticia de la detección de las ondas gravitacionales predicha por la relatividad general, la conversación con Weiss, ahora de 83 años de edad, y mi visita al entonces naciente LIGO, acudieron con viveza a mi memoria. Después de cuatro décadas de trabajo, de convencer a

FOTOS: LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION AND VIRGO COLLABORATION; ISOP; L. CALÇADA

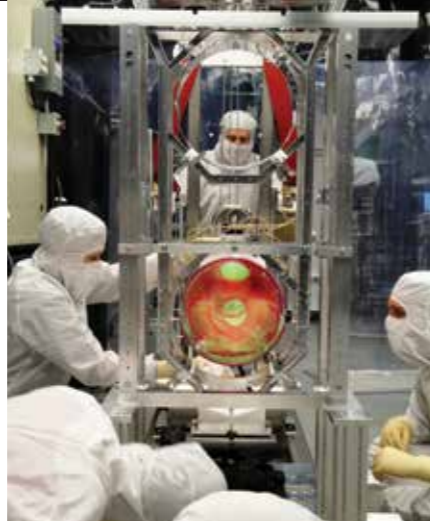
la National Science Foundation y al Congreso estadounidense, y de sortear una larga lista de retos financieros y tecnológicos, Weiss, el físico teórico de Caltech Kip Thorne y el físico experimental Ronald Drever, de la Universidad de Glasgow, las tres cabezas iniciales del proyecto, lograban hacer realidad la misión de LIGO: hallar fuentes de ondas gravitacionales mucho más allá de nuestra galaxia y abrir la posibilidad de escucharlas regularmente, pues el Universo está lleno de estallidos, uniones, colisiones y colapsos celestes, el mayor de los cuales hasta ahora es el mismísimo Big Bang.

## Plutonio y plantas rodantes

Llegar hasta la reservación nuclear de Hanford, que cubre 1,500 km cuadrados, no era fácil hace unos años, y todavía sigue teniendo un poco de misterio. No hay marcas en las intersecciones de la ruta 240 indicando algún observatorio. En cambio, un desierto pardo moteado de plantas que ruedan con el viento, como en las películas de vaqueros, formaba —y aún forma— un paisaje cargado de historia. Establecido en 1943 como parte del Proyecto Manhattan, Hanford fue el hogar del primer reactor de plutonio en el ➔



PROCESO. Arriba: ensamblaje del sistema de vacío de LIGO. Derecha: inspección final de uno de los espejos.



◀ mundo –el sitio donde se fabricó el plutonio usado en la bomba *Fat Man*, detonada sobre Nagasaki-. En un momento dado hubo aquí nueve reactores produciendo material nuclear para 60,000 armas.

Hay algo irónico en pisar un lugar que es actualmente el sitio con más contaminación nuclear en Estados Unidos, y a la vez la cuna de la astronomía del futuro. El observatorio está a millas de distancia de su vecino más cercano, un reactor nuclear de investigaciones carcomido por el tiempo.

A primera vista, LIGO Hanford –su hermano gemelo y la otra mitad de LIGO vive en medio de bosques bucólicos y uno que otro caimán, no lejos del poblado de Livingston, Luisiana- parece una bodega con buen diseño, o un museo de arte moderno de cuyos lados han brotado inexplicablemente dos tubos que recuerdan un oleoducto a ras del suelo, cubiertos por un túnel de concreto.

Durante un recorrido en el auto de los técnicos de mantenimiento por los cuatro kilómetros del camino adyacente a cada uno de los brazos de LIGO, es obvio que una insospechada molestia son los densos cardos rusos errantes. Las bolas de ramas secas continuamente se apilan a lo largo de los brazos del interferómetro, bloqueando el camino y obligando al equipo de limpieza a remover hasta 200 toneladas de ellas cada año.

**Ahora existe oficialmente una nueva forma de ver el Cosmos, 95% del cual permanece imperceptible a la astronomía tradicional.**

Al final de cada brazo hay un espejo que hace rebotar la luz. La velocidad de la luz dentro del vacío es constante, por lo que los haces regresan al punto de partida en perfecta sincronía, a menos que pase una onda de gravedad. En ese caso, la distancia entre los espejos y el láser varía ligeramente. Puesto que un rayo láser ahora cubre una distancia menor que la de su gemelo, ya no estarán en concierto al regresar. Y entre más fuerte es la onda, mayor es el desajuste.

Suena fácil hasta que uno entiende que una onda gravitacional que está a 1.3 mil millones de años luz de distancia –como la percibida en septiembre de 2015, producto de la unión de dos hoyos negros- nos llega tan débil que apenas logra causar una perturbación de menos de una trillonésima de pulgada en los haces de luz láser. Uno se pregunta de qué tamaño, entonces, sería una onda que estuviera, digamos, a apenas 1,000 km de distancia del agujero negro que la creó.

“Hice el cálculo, y en ese caso, la amplitud de la onda no sería mayor que el grosor de un cabello humano”, me responde el astrónomo Jorge Zuluaga,

Hasta no hace mucho, y por la secrecía que históricamente envolvía a Hanford, la gente de los alrededores estaba convencida de que el instrumento era un arma secreta militar. Se imaginaban que los dos brazos podrían levantarse del suelo y blandir rayos mortales contra un enemigo en el cielo.

Para ser la herramienta más sensible de la ciencia moderna, la arquitectura de LIGO no es tan masiva o impresionante como, por ejemplo, un Gran Colisionador de Hadrones. Por dentro, lo más interesante del observatorio es el Área de Vacío y Equipos Láser, un espacio que ocupa gran parte del edificio central y que aloja toda la óptica del interferómetro, más los tubos y cámaras de vacío donde se generan y viajan los rayos láser de un extremo al otro de los largos brazos de LIGO. Alguien comparó acertadamente esas cámaras con los tanques de acero sin pulir de una microdestilería de cerveza.

Es justamente en esos sistemas de vacío donde sucede la magia invisible.

Cuando una onda de gravedad pasa por la tierra, hace que todo lo que haya en ella, incluyendo a la gente, momentáneamente se estire y luego se comprima, a medida que la onda pasa. El objetivo de LIGO es medir ese fenómeno.

La detección de tales ondas comienza con un rayo láser de 200 vatios en un rincón del salón principal. El láser inyecta su luz dentro de un sistema de vacío donde es dividido en dos haces, que van a dar a cada uno de los brazos del observatorio.

FOTOS: LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION



# LISA Pathfinder y su hija eLISA

de la Universidad de Antioquia, en Colombia. “Las escalas que se manejan en las ondas gravitacionales son extremadamente pequeñas.” Por eso es difícil a veces acostumbrarse a los gráficos que dibujan las ondas gravitacionales como anchas bandas.

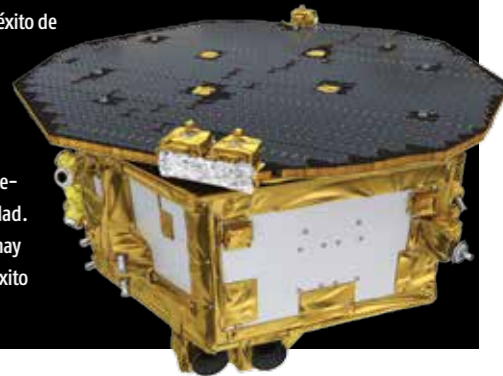
En todo caso, detectar esos diminutos cambios requiere un instrumento hipersensible. Y ésa es la razón detrás de los brazos de 4 km de LIGO: entre más largos son, mayores oportunidades hay de captar ondas de gravedad. Y para amplificar, o aumentar esa sensibilidad a niveles realmente exquisitos, los creadores del observatorio obligan al rayo láser a efectuar unos 300 viajes de ida y regreso, rebotando dentro de los brazos del detector. Ese truco hace que cada brazo tenga el equivalente a 800 kilómetros de largo.

Para garantizar que la señal percibida es en efecto una onda gravitacional, y no un tren o camión que pasa en la distancia, son necesarios dos observatorios iguales en los que la onda se detecte idénticamente. Por eso LIGO Hanford y LIGO Livingston, aunque los separan 3,057 km (o una centésima de segundo, a la velocidad de una onda gravitacional), trabajan juntos.

Las locaciones fueron escogidas porque son totalmente planas, son sísmica y acústicamente silenciosas, y ofrecen telecomunicaciones y alojamiento a una distancia razonable. Ambos instrumentos son casi iguales, pero tienen configuraciones ópticas que pueden cambiar, sintonizarse como un radio, para buscar ondas gravitatorias de diferentes frecuencias.

La misión de la Agencia Espacial Europea eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna) es hija de la exitosa misión espacial y prueba de concepto *LISA Pathfinder*. eLISA, un proyecto que sería lanzado en 2034, podría compararse con el telescopio óptico *James Webb* de la astronomía gravitacional: un ambicioso observatorio espacial diseñado para ver el Universo a través de ondas gravitacionales, en lugar de electromagnéticas. El interferómetro eLISA estaría compuesto por una constelación de tres satélites que orbitarían al Sol en una configuración de triángulo equilátero, separados por una distancia de un millón de kilómetros.

A comienzos de 2016 el sueño se acercó un poco más, por el éxito de las pruebas iniciales de *LISA Pathfinder*, que desde hace poco más de un año se encuentra en el punto Lagrange 1 entre la Tierra y el Sol, donde está en equilibrio estacionario entre la gravedad de ambos cuerpos celestes. Desde su lejana órbita, *LISA* ha logrado mantener en perfecta caída libre a dos cubos metálicos que están aislados de todas las fuerzas excepto la gravedad. Esta precisión es crucial porque rebotando entre ambos cubos hay un rayo láser. *LISA* es un rudimentario LIGO en miniatura, y su éxito ayudará a allanar el complejo camino de eLISA.



## Sensibilidad sin par

Durante ese recorrido por el instrumento de Hanford, donde los técnicos y visitantes usan trajes y mascarillas estériles como de hospital, aprendí por qué LIGO es uno de los lugares más extremos de la astronomía.

Para empezar, está el sistema de vacío dentro de la tubería. El aire es el mayor obstáculo para un rayo láser, razón por la que los tubos en los brazos del observatorio fueron evacuados hasta una trillonésima de presión atmosférica normal. Según el mismo Weiss, vaciar el aire de los tubos les tomó más de un mes. ▶

# Uniendo los brazos

El truco con las ondas gravitacionales es tener varios observatorios dispersos por el mundo para captarlas con más brazos. Existen varias colaboraciones científicas en astronomía gravitacional que permiten a los astrónomos de uno y otro país e institución compartir datos y usar los observatorios. La Colaboración Científica LIGO, por ejemplo, incluye a más de mil investigadores en al menos 80 instituciones internacionales.

LIGO colabora con el detector del Observatorio Gravitacional Europeo LSC-Virgo, en Pisa, Italia; y con el GEO600, en Sarstedt, Alemania. El recién llegado está en la India: días después de la detección de la primera

onda gravitacional, el primer ministro Narendra Modi dio luz verde al observatorio INDIGO y su colaboración con la National Science Foundation. Por su parte, los

japoneses están construyendo el KAGRA, un proyecto del Instituto de Investigaciones Cósmicas de la Universidad de Tokio.



GEO600.



VIRGO.

Después estaban los rayos láser. La curvatura en el espacio-tiempo que LIGO es capaz de medir está directamente relacionada con el poder del rayo láser. Entre más poder tenga y menos interferencias se presenten, LIGO podrá analizar ondas más pequeñas que vienen de más lejos.

Como descubrió Ronald Drever durante sus investigaciones iniciales, un interferómetro de ondas gravitacionales requiere un láser que sea estable como una roca. Cualquier cambio en intensidad o en frecuencia podría interpretarse erróneamente como el efecto de una onda. Inicialmente, la idea era que LIGO usara un láser de iones de gas argón, un tipo de rayo que produce una luz verde intensa. Pero en el último minuto lo cambiaron por uno infrarrojo en estado sólido, que es mucho más estable, y que amplifica la luz con un cristal de granate y una tierra rara llamada itrio. Este láser es tan invariable, que entre billones de trillones de ciclos de luz, su frecuencia no varía más de un ciclo.

**UBICACIÓN.** LIGO Hanford está en el sureste del estado de Washington, EUA, en medio de una vasta planicie.

## LIGO es tan sensible, que siente las vibraciones del caminar de una persona, el ruido del mar y hasta el titilar de los átomos individuales dentro de los espejos.

Se necesitaba evitar que la luz dispersara cualquier molécula de gas que anduviera por ahí perdida, creando intrusiones no deseadas. Los pocos átomos que se las arreglan para quedar dentro del tubo al vacío apenas lograrían llenar un dedal a presión atmosférica normal. Y, puesto que cada detector ocupa un volumen de 300,000 pies cúbicos, LIGO terminó creando el sistema de vacío artificial más grande del planeta.

Los diseñadores del observatorio lograron esta perfección de vacío porque aceptaron el riesgo de irse con un concepto radical. Mandaron hacer una clase de aluminio especial, una aleación que fue cocida durante varios días para remover el exceso de hidrógeno a niveles cien veces menores que aquellos de los sistemas de vacío comercial. Lo que sucede normalmente es que los átomos de acero se desprenden de las placas de acero y tapan el sistema de vacío —esto es algo con lo que pelean los diseñadores de aceleradores de partículas, por ejemplo—.

La sensibilidad del interferómetro LIGO es tal, que logra captar fuentes de interferencia tales como las vibraciones del océano y del viento —la temporada de huracanes en Luisiana es un dolor de cabeza mayúsculo, no importa que LIGO esté a millas de distancia de la costa—. Además, LIGO es quisquilloso con el caminar de una persona, el pasar de un auto, el aullar de un lobo, el vuelo de un avión, el timbre de un celular, el soltar el agua de los baños, las deformaciones de la corteza terrestre causadas por la atracción de la Tierra y la Luna, y lo más asombroso: el titilar de los átomos individuales dentro de los espejos. El problema es que cualquiera de estas interferencias puede ser malinterpretada como una onda gravitacional.

Una de las cosas que más preocupa a los astrónomos de LIGO, no obstante, son las tormentas que cubren las grandes planicies estadounidenses. Porque son una fuente de interferencia que puede sentirse simultáneamente en ambos detectores. Cuando

una tormenta, por decir algo en Utah, desgaña un rayo con una corriente de millones de amperios, ese rayo produce un campo magnético que se propaga por todo el país. Es posible, entonces, que ambos observatorios lo vean al mismo tiempo.

Varios de los sistemas más sofisticados de LIGO fueron inventados para mitigar todas esas interferencias. La adquisición de datos es alucinante. Un ejército de sísmómetros, inclinómetros, magnetómetros y detectores de rayos cósmicos envían datos las 24 horas del día y los siete días de la semana, a través de varios miles de canales simultáneamente a razón de seis millones de bytes por segundo. La información pasa en tiempo real a un banco de computadoras que filtran y comprimen los bytes, y eso pasa a Caltech para su análisis.

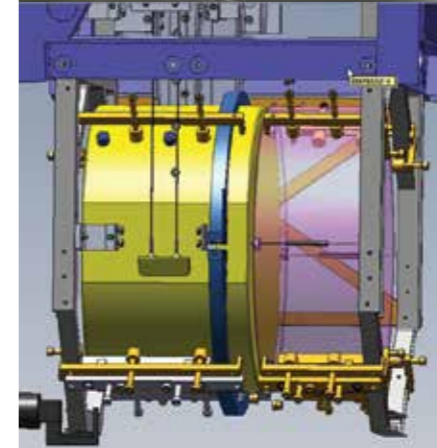
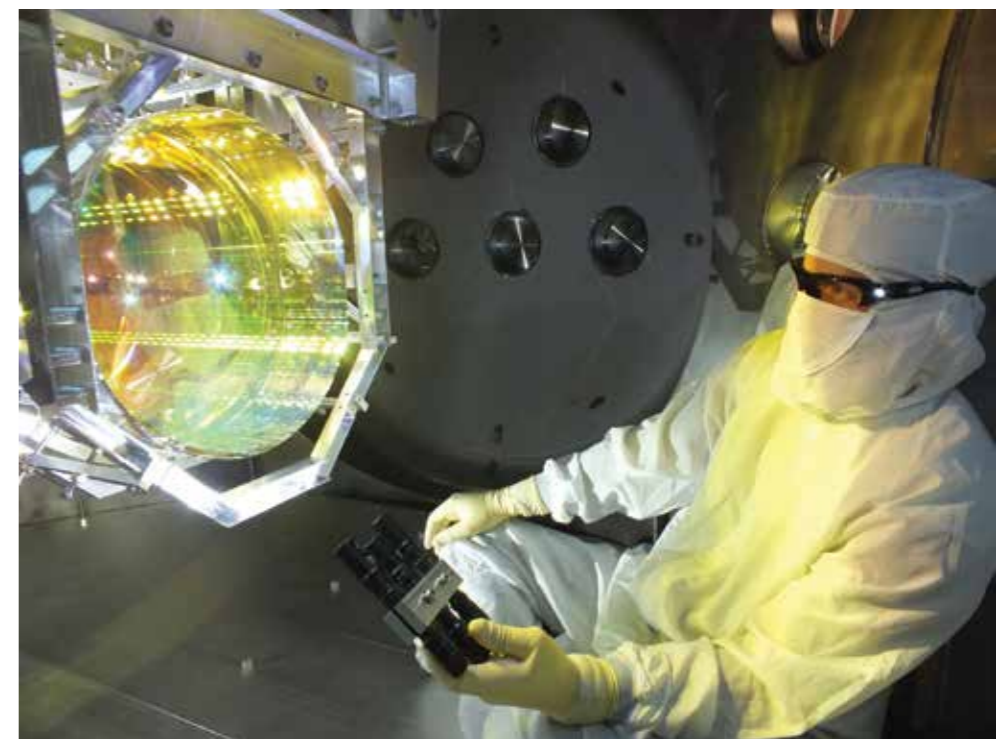
Otro sistema se especializa en monitorear los movimientos de los espejos donde rebota el láser, grabándolos en un canal especial, el canal de la onda gravitacional. A este canal llega menos del 1 por ciento de toda la data recibida; pero de llegar una onda gravitacional, es el canal donde se hallaría su rastro.

Escoger la señal de la onda, de entre toda la basura, es algo similar a la manera en que los expertos en sonares militares buscan el sonido que distingue a un submarino que está rodeado de ruidos en el mar. A medida que llega la información, se va comparando con una plantilla, que es básicamente una adivinanza teórica de lo que sería una onda gravitacional. Y puesto que la masa de los objetos que emiten estas ondas, y su orientación con respecto a la Tierra, es diferente, los patrones de ondas también son variados y distintos. Para hacer una búsqueda concienzuda, LIGO debe comparar su torrente de información contra unos 30,000 patrones de señales, continuamente, día y noche.

### Espejos heroicos

Pero nada de esto sería posible sin los magníficos espejos en los brazos del interferómetro.

Crearlos fue “una labor heroica, que empujó los límites de la tecnología”, según la ingeniera óptica GariLynn Billingsley, de Caltech, quien dirigió la fabricación de la óptica del observatorio. Fueron hechos fundiendo sílice muy puro especialmente creado para que no absorbiera radiación infrarroja (porque el láser de LIGO es infrarrojo). De hecho, esos espejos sólo absorben un fotón de cada 3.3 millones. Su cara está pulida hasta lograr una cienmillonésima de esfera nanométricamente perfecta, para garantizar una superficie reflectora que permita al láser rebotar una y otra vez sin perder su esencia. “Imagine que la Tierra fuera así de lisa. Entonces las montañas no tendrían más de dos centímetros de altura.”



**REBOTES.** Los espejos están suspendidos en el aire por las más delicadas fibras de sílice, con el objetivo de no sentir otra fuerza que la gravedad.

Se escogió hacerlos de sílice porque este material ayuda a reducir una de las fuentes principales de interferencia en un interferómetro: un fenómeno llamado “ruido térmico”. A temperatura ambiente los átomos dentro del espejo vibran continuamente, y estos movimientos fácilmente pueden enmascarar la señal de una onda gravitacional. Pero si el material

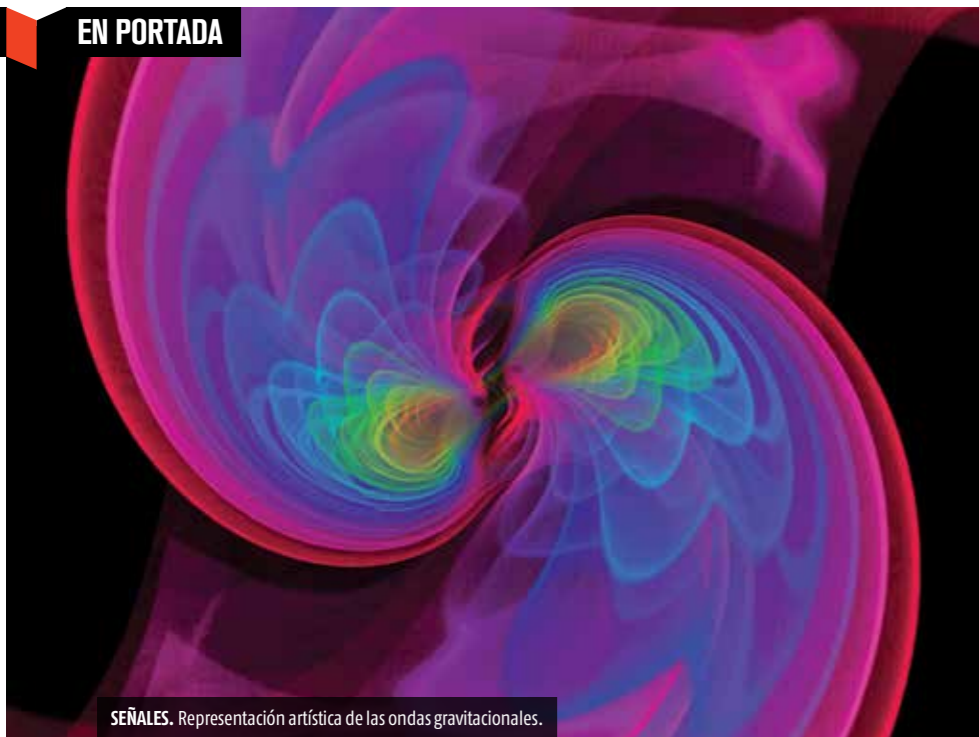
del espejo actúa como una campana, esos zarandeos quedan confinados a ciertas frecuencias estrechas, dejando el resto de la banda para las ondas gravitacionales.

Aunque pesa 40 kilos, cada espejo está montado en un sistema de péndulos, suspendido en el aire por las más delicadas y puras fibras de sílice, para no sentir otra fuerza que la gravedad. Acunado así como un bebé, el espejo puede mecerse para adelante y para atrás, sin perturbar las mediciones. Esto es importante porque cuando pasa una onda gravitacional, el espacio-tiempo entre los espejos temblará sutilmente, haciendo mover los trozos de vidrio entre 100 y 3,000 veces por segundo.

Es decir, ondas cuya frecuencia está entre los 100 y los 3,000 hertz, que es el rango de sensibilidad de LIGO, parte del cual cae dentro del rango auditivo humano, entre 30 y 250 hertz. En ese sentido, la onda percibida en septiembre apareció en las pantallas como un garabato comprimido, pero los oídos de LIGO alcanzaron a traducir para los nuestros unas centésimas de segundo de la magna unión de esos dos agujeros negros. De cierta manera fue divertido porque el sonido, que es un débil whoooop, como un glissando, dejó perplejos a muchos, que esperaban una manifestación más viril de un evento cósmico tan violento. ▶

FOTOS: MAX-PLANCK-GESSELLSCHAFT, MÜNCHEN/ GEO 600; EUROPEAN GRAVITATIONAL OBSERVATORY/ VIRGO; LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION

FOTOS: LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION



SEÑALES. Representación artística de las ondas gravitacionales.

◀ **La orquesta cósmica**

Musicalmente hablando, los 100 a 3,000 hertz que puede escuchar LIGO se traducen aproximadamente a un rango de sonidos que va desde un La bemol hasta un Fa sostenido. Eso es suficiente, dice el director ejecutivo de LIGO, David Reitze, para que nuestros oídos eventualmente puedan percibir una orquesta cósmica, ya que las diferentes fuentes de ondas gravitacionales allá afuera emiten sus propias notas. Así, un sistema binario de estrellas de neutrones podría sonar como un piccolo. Un púlsar solitario podría aportar el “ting” del triángulo y una supernova serían los platillos. Los agujeros negros estarían en la sección de cuerdas, tocando el contrabajo, las violas y los violines, según su masa. Para oír la orquesta completa habrá que esperar a las siguientes generaciones de detectores, porque LIGO es sólo el comienzo.

Y debajo de todos los chirridos, tambores y ritmos que emanan del mundo de las ondas gravitacionales, podríamos escuchar un murmullo constante, uniforme y delicado como un susurro. Este siseo sería la débil reverberación de la creación de nuestro Universo, el eco de ese trueno que perdura, similar al calor residual de microondas que ya hemos detectado en la radiación cósmica de fondo.

La diferencia es que esas microondas comenzaron su viaje medio millón de años después del Big Bang, el momento en que la luz finalmente pudo viajar a través del Universo sin impedimentos del revoltijo de partículas en su camino. Pero las ondas gravitacionales pasaron por entre esa neblina como un cuchillo caliente cortando mantequilla.

Si las logramos ver, dice Kip Thorne, serán los fósiles del primer instante de la creación, porque ninguna otra señal sobrevive de esa era. Y quizá verificarían que el Universo salió de una especie de fluctuación cuántica de la nada. Nos podrían decir asimismo qué tan rápidamente se ha expandido el Universo a lo largo de los milenios.

**LIGO predice que en el futuro podría detectar varios cataclismos cósmicos al año.**

“Se podrían concebir como tubos extremadamente delgados de espacio-tiempo, más flacos que el ancho de un átomo, que conservan aún las condiciones energéticas del Big Bang. De sobrevivir alguna, sería una cuerda excepcionalmente larga, tanto como el ancho completo del Universo. O podrían hallarse enrolladas sobre sí mismas, creando bucles cerrados que continuamente pierden masa y energía al vibrar a velocidades cercanas a la luz.”

Si estas poderosas cuerdas realmente existen, sería peligroso estudiarlas de cerca. Según los físicos teóricos, aunque tales cuerdas serían delgadas al extremo de poder pasar a través del cuerpo sin tocar un solo átomo, su extraño campo gravitacional sería el horror.

“Si una cuerda cósmica pasa a través tuyo, tu cabeza y tus pies correrían uno hacia el otro a razón de 10,000 millas por hora. Y por la gran tensión que lleva la cuerda, se menearía como una banda de caucho, produciendo muchas ondas gravitacionales.”

Los telescopios de rayos X, por su parte, sugieren que hay una buena parte del paisaje celeste que está maduro para ser estudiado con astronomía gravitacional. Por ejemplo, están los rayos X que emiten flujos de gas cerca del centro de una galaxia activa llamada MCG6-30-15. Ese gas viaja a casi la velocidad de la luz. Algunos astrónomos piensan que la explicación de esa velocidad es que el gas está acelerado por un enorme agujero negro. Pero únicamente los observatorios de ondas gravitacionales podrán confirmarlo con seguridad.

estudiado con astronomía gravitacional. Por ejemplo, están los rayos X que emiten flujos de gas cerca del centro de una galaxia activa llamada MCG6-30-15. Ese gas viaja a casi la velocidad de la luz. Algunos astrónomos piensan que la explicación de esa velocidad es que el gas está acelerado por un enorme agujero negro. Pero únicamente los observatorios de ondas gravitacionales podrán confirmarlo con seguridad.

**Lo grave de la gravedad**

Objetos extravagantes del Cosmos aparte, uno de los santos griaes de la física es hallar la partícula hipotética que le confiere su fuerza a la gravedad: el gravitón. ¿Por qué nadie lo ha encontrado aún? La gravedad es algo curioso. Nos podrá parecer fuerte cuando subimos una pendiente, pero en realidad es sumamente débil: hasta 36 órdenes de magnitud más débil que el electromagnetismo. Su influencia en las cosas subatómicas

También nos podrían dar a conocer nuevas criaturas celestiales. La radioastronomía nos regaló los púlsares y cuásares (‘cuasi-estrellas’). ¿Qué cosas raras nos darán LIGO y sus observatorios compañeros en el resto del mundo, y fuera de él?

Ya los físicos teóricos hablan de reliquias del universo temprano, “defectos” topológicos muy energéticos que fueron generados a medida que el Cosmos se enfriaba, después de su primer segundo de existencia. Estas reliquias hipotéticas incluyen arrugas, monopolos magnéticos en forma de punta y cuerdas cósmicas de una dimensión, que se habrían formado de manera similar a las grietas que aparecen cuando el agua se congela.

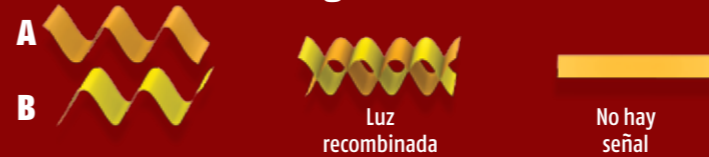
“Uno de los defectos hipotéticos más interesantes en esta temprana tela, serían las cuerdas cósmicas”, escribe Bartusiak.

FOTOS: LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION

**Así funciona**



**No detección de onda gravitacional**



**Detección de onda gravitacional**

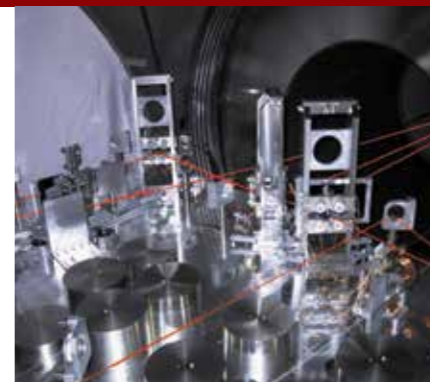


es insignificante. En cambio, es la fuerza que rige el Universo en escalas cósmicas. Cerca de un agujero negro, por ejemplo, se convierte en algo tan fuerte, que es capaz de romper átomos. Entender su funcionamiento con el mayor detalle es entender la naturaleza misma del Universo.

Quizá un ejemplo más intuitivo es el comportamiento de un imán y un clip para sujetar papel. El imán agarra al clip contra la gravedad de la Tierra. Piense en lo que eso significa. Un pequeño imán de nada, como el que usamos para pegar una foto en el refrigerador, es capaz de atraer al clip de metal hacia arriba, mientras que la gravedad de todo un planeta lo jala hacia abajo, y el imán gana.

Los gravitones individuales interactúan muy débilmente, y la única razón por la cual no estamos flotando en el aire es porque la Tierra emite muchos de ellos. Puesto que un gravitón solito es tan sumamente debilucho, es imposible (hasta ahora) detectarlo.

No obstante, hay allá afuera ideas innovadoras acerca de la gravedad, según las cuales podrían existir otras formas de gravitones que podrían ser detectables, pues algunos llegarían a tener masa. Esas ideas sugieren que la gravedad podría tener acceso a más de tres dimensiones. En ese caso, la gravedad no sería tan débil como creemos. Es sólo que parece débil porque, a diferencia de las otras tres fuerzas fundamentales, ésta tendría más dimensiones extra en las cuales extenderse. Dimensiones pequeñísimas: de 150 micrómetros.



MAPA. Ruta que sigue el rayo láser antes de ser inyectado en el túnel de vacío.

El Observatorio Avanzado de Interferometría Láser de Ondas Gravitacionales (LIGO, por sus siglas en inglés), con detectores gemelos en los estados de Luisiana y Washington, busca escuchar las ondas de gravedad formadas por sucesos cataclísmicos en el Universo. Estas ondas podrían compararse con la perturbación del agua al lanzar una piedra en un charco, pero en realidad suceden cuando algo sacude la fibra flexible de espacio-tiempo de que está hecho el Cosmos.

Cada detector hace rebotar muchas veces un rayo láser entre espejos localizados en los brazos en forma de L del observatorio. Cuando los rayos son recombinados en uno solo y no ha sucedido ninguna detección los haces de luz no habrán sufrido ningún cambio, por lo que se cancelan el uno al otro, haciendo que no haya luz visible al final. Pero si en ese momento pasa por la Tierra una onda gravitacional, haciendo encoger y estirar la longitud de los haces de láser, los rayos ya no serán iguales al recombinarse, y esa señal sí aparecerá en las pantallas.

No obstante, la señal es muy débil: catástrofes como la unión de dos agujeros negros a distancias enormes producen ondas que nos llegan con un tamaño alucinantemente pequeño, haciendo cambiar la longitud de los brazos de LIGO en menos del diámetro de un protón.

La mecánica cuántica nos dice que cada partícula es también una onda que vibra, y se ha propuesto que los gravitones pueden vibrar dentro de esas dimensiones extra, envolviéndose alrededor de esa dimensión como si fueran pulseras alrededor de una muñeca muy delgada.

“Nunca habíamos estudiado la gravedad a través de todo el Universo”, me dijo en una ocasión el Nobel de Física Adam Riess. “Bien podría ser que no exista ninguna energía oscura, sino que sea un mal entendimiento sobre cómo es verdaderamente la gravedad. Podría ser que la gravedad cambie su forma

de operar a través de las grandes distancias. Básicamente, no sabemos de esta legendaria fuerza tanto como creemos.”

¿Podrá la nueva astronomía de ondas gravitacionales darnos el gravitón? Los astrónomos de esta nueva etapa en la ciencia celeste están haciendo invertir miles de millones de dólares en la construcción de interferómetros en el espacio, donde podrían detectar otras fuentes astrofísicas de extremadamente bajas frecuencias, entre una millonésima de hertz y 1 hertz. Y aunque nadie le quitará a LIGO la gloria de haber sido el primero en literalmente escuchar la música del Cosmos, al final del día, como dice Thorne, llegaremos a un entendimiento de las leyes fundamentales del Universo, y ése será el verdadero regalo cultural para nuestros descendientes. **M**

**PARA SABER MÁS**

La sinfonía inacabada de Albert Einstein, de Marcia Bartusiak. <http://bit.ly/20Y21eH> Sonido de un agujero negro, Caltech.