

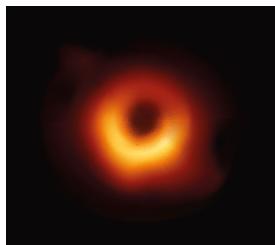


Einstein,

AGUJEROS NEGROS Y ONDAS GRAVITACIONALES

Por GABRIELA GONZÁLEZ

Universidad Estatal de Luisiana, Estados Unidos



Hace más de 100 años, Einstein predijo que el espacio-tiempo era dinámico, y había “ondas gravitacionales” que viajaban a la velocidad de la luz. En septiembre de 2015, los dos observatorios de LIGO en EE.UU. detectaron, por primera vez, una señal debida a ondas gravitacionales viajando a través de la Tierra, creadas hace unos 1.300 millones de años por el abrazo final de dos agujeros negros que “habían estado bailando el tango”. Desde entonces, se han detectado varias señales más, incluyendo fuegos artificiales originados por la colisión de estrellas de neutrones, ayudándonos a entender el origen de metales pesados (y preciosos). En esta conferencia, Gabriela González describe la larga e increíble historia de este descubrimiento y el futuro de este nuevo campo de la Astronomía.

Dos agujeros negros giraban uno alrededor del otro emitiendo energía en forma de ondas gravitacionales, bailando un tango. Se acercaban moviéndose cada vez más rápido hasta que terminó el tango en un abrazo, en una fusión de los dos agujeros negros

Esta historia empieza hace mucho tiempo. Para algunos hace sólo unas décadas, desde que iniciamos la construcción de los detectores que terminaron descubriendo ondas gravitacionales. Para otros, hace cien años, cuando Einstein publica su Teoría de la Relatividad General. En mi opinión, esta historia empieza hace más de mil millones de años, cuando dos agujeros negros giraban uno alrededor del otro emitiendo energía en forma de ondas gravitacionales, bailando un tango. Se acercaban moviéndose cada vez más rápido hasta que terminó el tango en un abrazo, en una fusión de los dos agujeros negros. Y esa señal, producida hace más de mil millones de años, cuando en la Tierra no había humanos, ni peces, ni apenas organismos multicelulares, esa señal fue la que medimos el 14 de septiembre del 2015.

La Ley de la Gravedad, la Ley de Newton fue revolucionaria en su época. Unificó conceptos universales y cotidianos. Era revolucionaria porque explicaba fenómenos normales, pero también fenómenos que ocurren en el cielo. Así empezó esta aventura de la Física de tratar de entender el Universo con leyes que llamamos universales.

En 1905, Einstein trabajó con teorías de electromagnetismo, explicando y unificando la electricidad y el magnetismo. Esta medición se había hecho antes pero en sistemas que se movían a velocidades relativas unos con otros, que es lo que llamamos la Teoría de Galileo. Einstein descubrió que las predicciones eran

ciertas, que la luz viaja a la misma velocidad en cualquier sistema. Pero esa Teoría de la Relatividad Especial también implicaba que la velocidad de la luz era la velocidad máxima, no hay nada que se mueva, que se transmite más rápido que la velocidad de la luz.

Sin embargo, la fuerza de la gravedad entre la Tierra y el Sol es instantánea. Si el Sol desaparece, la Tierra inmediatamente, de acuerdo a Newton, empieza una trayectoria lineal, lo que contradecía la velocidad máxima. Einstein trabajó durante diez años para resolver esa contradicción. Estableció una nueva teoría de la gravedad, la Teoría de la Relatividad General no especial que dice que todas las masas y partículas viven en el espacio-tiempo. Si la luz viaja en este espacio-tiempo curvo, la luz va a seguir el camino más corto, que es un camino curvo. Eso se comprobó en 1919 con un eclipse. Durante un eclipse, podemos ver la luz de las estrellas que está pasando cerca del Sol y podemos comparar la posición en la que creemos que están las estrellas, debido a la luz que nos llega, con la posición que medimos de noche, cuando el Sol está del otro lado y la luz de las estrellas no nos llega, no pasa cerca del Sol. Esa desviación, ese movimiento aparente de las estrellas, medidas de día o medidas de noche fue lo que hizo Eddington en 1919, comprobando la Teoría de la Relatividad General. Esa fue la primera comprobación experimental.

Pero la predicción que a nosotros nos interesa dice que cuando dos masas giran,

una alrededor de la otra, las deformaciones del espacio-tiempo son ondulatorias. Esas son las ondas gravitacionales. Esas ondas gravitacionales se están llevando energía del sistema, lo que hace que las dos estrellas o los dos agujeros negros, se acerquen cada más. Esa es una predicción única. Newton predecía que estas dos estrellas girarían a la misma distancia para siempre. Por el contrario, Einstein predice que se van a acercar tanto, que si son dos agujeros negros, se van a fusionar en un solo agujero negro. Y un solo agujero negro que queda rotando, no va a generar más ondas gravitacionales porque para generar ondas gravitacionales, hay que arrugar el espacio-tiempo y la deformación del espacio-tiempo, debido a este agujero negro rotante, no tiene estas ondulaciones.

Objetos perfectamente esféricos no producen ondas gravitacionales.

Tiene que haber alguna diferencia, alguna imperfección. Si tenemos dos estrellas, eso ya no es esférico, si tenemos una estrella con una montaña, ya no es esférica, pero un agujero negro es perfectamente esférico. En 2005, las ecuaciones de Einstein pudieron predecir cuál era la deformación del espacio-tiempo que mediríamos aquí en la Tierra. La predicción es que se mide una onda, que es una onda sinusoidal, y a medida que se van acercando los agujeros negros, van girando más rápido, la onda sinusoidal aumenta de amplitud, aumenta de frecuencia y luego decrece, y desaparece.

En 1916, apenas un año después de publicar su Teoría de la Relatividad General, Einstein hizo las cuentas acerca de estas ondas gravitacionales. Cuando se ponen los



números, las constantes de la ecuación, la amplitud de estas ondas, el cambio de estas distancias es pequeñísimo. Ello indica que la gravedad es una fuerza muy débil, tiene efectos muy pequeños. Hacen falta masas muy grandes moviéndose muy rápido para que haya algún efecto medible. Otra predicción de este efecto es que las distancias cambian perpendiculares a la dirección de propagación, pero esta distancia cambia distinto que aquellas; si esta se acorta, esta se alarga y si esta se alarga, esta se acorta; es lo que llamamos una onda cuadrupolar, esa es otra predicción de la teoría. ¿Cuán pequeñas son estas ondas? La amplitud de esta primera onda gravitacional que medimos no es de metros sino en cambios de fracción. Es decir, lo que predice la teoría es el cambio fraccional de la distancia. Mientras más larga la distancia,

La onda detectada había sido producida por la colisión de dos agujeros negros, uno de 29 masas solares y otro de 36. Cuando se fusionaron produjeron un agujero negro de 62 masas solares

más grande es el cambio de distancia. La amplitud de la onda es 10^{-21} . Lo cual quiere decir que, si queremos un cambio de distancia de un metro, necesitamos medir 10^{21} metros.

¿Cómo medimos eso? Lo hicimos con interferómetros. En interferómetros tenemos un haz de láser que se divide en dos con un espejo semitransparente. El láser es una onda electromagnética que se divide en dos, rebota en espejos que están a una distancia de cuatro kilómetros en el caso del LIGO, vuelven las ondas y salen dos ondas, una vieniendo de un brazo, otra vieniendo del otro brazo. Si esas dos distancias son iguales, las dos ondas se cancelan, no hay luz saliendo del interferómetro. Si las distancias están cambiando y si es una onda gravitacional, una se achica y otra se alarga, estas ondas dejan de cancelarse, se cancelan de nuevo, dejan de cancelarse. Es decir, si ponemos una fotocélula a la salida, lo que estamos midiendo es la cantidad de luz en esa fotocélula y medimos más luz, menos luz, más luz, menos luz. Eso indica que hay una onda gravitacional y que la distancia que viaja el láser en este brazo es distinta a la distancia que viaja el láser en el otro brazo.

Este experimento debe hacerse en vacío. Si se hace en aire, las distancias serán distintas porque el láser va a ser perturbado por el índice de refracción del aire. Necesitamos que el ruido sea menor que 10^{21} multiplicado por la longitud de estos brazos. Por ese motivo los interferómetros tienen que ser tan largos. Los dos interferómetros que se cons-

truyeron en Estados Unidos en el proyecto LIGO tenían una longitud de cuatro kilómetros. Si estamos midiendo una diferencia de distancia de 10^{-21} multiplicada por cuatro kilómetros, estamos hablando de una distancia menor que un átomo, en concreto de cuatro milésimas del radio de un protón. Es decir, estamos midiendo diferencias de milésimas de protón. Algo aparentemente imposible de medir. Sin embargo, en los años 70, Rainer Weiss en MIT y Kip Thorn en Caltech, pensaron que la medición era posible con interferómetros lo suficientemente largos y se invertía suficiente tiempo en desarrollar la tecnología y suficiente gente trabajando en estos proyectos. Pero sabían que iba a tardar décadas.

Los detectores

En los años 90, la agencia científica de Estados Unidos, la NSF, National Science Foundation, construyó dos detectores. Uno en Luisiana, cerca de Baton Rouge y otro en Hanford, Washington. Uno en medio de un bosque, otro en el medio de un desierto. Simultáneamente se construyeron detectores en Europa. Uno de 600 metros en Alemania, que fue un proyecto británico alemán; otro de tres kilómetros en Italia, que es ahora un proyecto europeo. Y mientras tanto, alrededor de estos dos observatorios de LIGO en Estados Unidos, se creó una colaboración científica internacional. Actualmente grupos españoles participan tanto de la colaboración de Virgo, como de la colaboración de LIGO. Hay dos proyectos más, uno en Japón, llamado Kagra, que está dentro

de una montaña, también tres kilómetros de largo, pero dentro de una montaña, lo cual tiene algunas ventajas. Y otro observatorio que se está construyendo en India. Todo esto es un proyecto global y ciertamente ahora es un campo en el que la colaboración importa mucho más que la competitividad. Hacemos mejor Ciencia todos juntos, que compitiendo unos con otros.

Tenemos toda una red global de detectores. No son detectores simples. Los espejos deben estar aislados del ruido sísmico, del ruido de la Tierra, porque la Tierra se mueve mucho más que milésimas de protón. Así que colgamos esos espejos en péndulos, que son aisladores sísmicos. Utilizamos un sistema de aislación sísmica con un péndulo cuádruple dentro de una cámara de vacío. Usamos un láser bastante potente para poder tener muchos fotones, lo cual reduce el ruido cuántico. Tenemos que pelear con el ruido sísmico, con el ruido cuántico, con el ruido térmico, porque los átomos dentro de los espejos se están moviendo todo el tiempo, tenemos que diseñar e instalar todos estos sistemas para poder conseguir la sensibilidad que nos permite medir milésimas de protón. Eso fue lo que hicimos.

El 14 de septiembre de 2015 detectamos una onda sinusoidal que aumenta de amplitud y frecuencia y que decae. Por esa frecuencia dedujimos que se trataba de agujeros negros. La señal pasó primero por Livingston, y siete milisegundos más tarde, por Hanford. Si hubiera pasado 20 milisegundos más tarde, hubiéramos dudado de que se tratara de una onda gravitacional porque la predicción dice que las ondas gravitacionales viajan a la velocidad de la luz y la velocidad de la luz, viajando en línea recta entre Livingston y



Hanford, tarda apenas diez milisegundos. Es decir, esta onda estaba a siete.

La onda detectada había sido producida por la colisión de dos agujeros negros, uno de 29 masas solares y otro de 36. Cuando se fusionaron produjeron un agujero negro de 62 masas solares. Pero en el recuento faltan tres masas solares. Esas tres masas solares no fueron un error de aritmética, fue la masa que se convirtió en energía de ondas gravitacionales. Tres masas se convirtieron en una energía tremenda de estas ondas gravitacionales. La energía de las ondas es muchísima, el problema es que somos todos casi transparentes a esa energía. Estas ondas gravitacionales están pasando por la Tierra con menor amplitud porque si no, la mediríamos, pero están pasando todo el tiempo con mucha energía, pero con poco efecto físico.

Estas son ondas de espacio-tiempo, no son ondas de sonido, pero como las frecuencias que producen son de alrededor de unos 100 Hz, esta frecuencia es sensible al oído humano. Entonces, la digitalizamos, le añadimos 400 Hz, la conectamos a un altavoz, y la pudimos escuchar. Si los astrónomos pintan

Todo esto es un proyecto global. Es un campo en el que la colaboración importa mucho más que la competitividad. Hacemos mejor Ciencia todos juntos, que compitiendo unos con otros

de rojo el infrarrojo que no se ve y de azul el ultravioleta, nosotros podemos cambiar la frecuencia también. A mí me gusta decir que esta fue la primera nota musical del Universo. Lo único que nos molestaba -y muchísimo-, es que todavía no habíamos tomado datos con los detectores. Necesitábamos tener datos para tener estadísticas. Para verificar realmente que no se trataba de ruido si no de una señal. Nos tomó varios meses. Finalmente nos convencimos de que esta primera onda había sido real.

El 11 de febrero del 2016 anunciamos el descubrimiento de la primera onda gravitacional. Hubo dos conferencias de prensa simultáneas. Una en Italia, cerca del observatorio Virgo, a pesar de que esta detección fue hecha con los detectores de LIGO, estábamos trabajando en colaboración con los científicos de Virgo; y en Estados Unidos, en Washington, estábamos Kip Thorn de Caltech, Rainer Weiss de MIT, Dave Reitze de Caltech, el director ejecutivo del Proyecto LIGO, y yo misma como portavoz y líder de la colaboración científica de LIGO. La conferencia de prensa estaba dirigida por France Córdova, una científica y astrónoma, directora de la Agencia Científica de Estados Unidos, la NSF. Fue un momento maravilloso. La rueda de prensa coincidió, además, con la celebración del primer Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia. Y allí estábamos dos mujeres entre cinco científicos. Lo cual, lamentablemente, no es representativo de la fracción de mujeres en Física y en Astronomía, pero esperamos que haya sido

una inspiración para todos los que estaban mirando esa conferencia de prensa y todos los futuros científicos.

Este descubrimiento fue galardonado con el Premio Nobel, otorgado a Kip Thorn de Caltech, a Rainer Weiss de MIT y a Barry Barish, uno de los primeros directores ejecutivos del proyecto de los observatorios y, sobre todo, un director en un momento en el que hacía falta una dirección para empujar el proyecto en la dirección correcta. Una cosa importante para todos nosotros, es que la Fundación Nobel atribuyó la filiación de los galardonados a la Colaboración de LIGO y de Virgo; es decir, fue un reconocimiento al trabajo en equipo. ¿Quiénes somos en esta colaboración? En la colaboración científica de LIGO, tenemos alrededor de 100 instituciones, 1300 miembros en 20 países diferentes, incluyendo España. Y detrás de cada una de esas instituciones hay científicos, técnicos, ingenieros que trabajamos en este proyecto.

La toma de datos

Entre septiembre de 2015 y enero de 2016 descubrimos tres señales de coalescencias de agujeros negros. Trabajamos en la mejora de la sensibilidad de los detectores y el 30 de noviembre del 2016 empezamos a tomar datos con los detectores en Estados Unidos. Sabíamos que Virgo empezaría en agosto. Necesitábamos tres detectores para saber exactamente en dónde se origina la onda gravitacional. Detectamos varias señales más,

en enero, en junio, en esta segunda campaña, pero por alguna razón, en el mes de agosto detectamos varias señales más. La primera onda es en la que determinamos que habían colisionado dos agujeros negros de 29 y 36 masas solares, formando uno de 62 a mil trescientos millones de años luz. La amplitud de la onda gravitacional es todavía la más grande que hemos medido. La tercera, que fue el 26 de diciembre, fue la señal de los agujeros negros más asimétrica, casi con un factor dos de diferencia en masa; uno tenía 14 masas solares y el otro 8. Es decir, mucho menores que la primera señal. La quinta señal, que fue el 8 de junio del 2017, es el sistema más pequeño, en donde la masa final es de apenas 19 masas solares. El agujero negro más grande que se conocía, era de alrededor de 20 masas solares y no todo el mundo creía que era un agujero negro. Eran casi todos menores de diez masas solares y aquí el más pequeño que tenemos, es de 19. Es decir, estamos aprendiendo muchísimo de agujeros negros. El 29 de julio de 2017, medimos el más masivo, la masa final eran 80 masas solares comparadas con 62 del primero. Pero su señal no era más grande que la del primero. Ello se explica porque estaba mucho más lejos, a nueve mil millones de año luz. Estaba a una distancia mucho mayor y la señal aquí en la Tierra era bastante menor, a pesar de estar producida por mayores masas.

¿Cómo determinamos el origen y la dirección de estos sistemas en el cielo? Cada detector funciona como un micrófono. Con tres detectores podemos triangular. Necesitamos triangular para saber la distancia a la que está, cuántas masas tienen, y qué ocurre alrededor de ese sistema. Queremos que los astrónomos, usando telescopios, telescopios ópticos, telescopios de rayos gamma, telescopios de rayos X, miren en esa dirección para ver si hay ondas electromagnéticas. Ya con tres detectores funcionando detectamos señales el 14, el 17 y el 18 de agosto.

La del 17 de agosto fue muy importante. Se trataba de una señal muy larga. Sabíamos que era producida por masas mucho más pequeñas, pero desconocíamos si se trataba de agujeros negros pequeños o de estrellas de neutrones, que son sistemas de estrellas muy compactas que también pueden girar muy rápido cuando colisionan y producir ondas gravitacionales. Las estrellas de neutrones, producen ondas gravitacionales pero también ondas electromagnéticas. Nos convencimos de que se trataba realmente de estrellas de neutrones porque se detectaron ondas electromagnéticas apenas menos de dos segundos después de la colisión de estas estrellas. Estas señales viajaron 130 millones de años para llegar a la Tierra. Los rayos gamma se produjeron tras el choque de las estrellas. O sea, que había alguna diferencia temporal. Después de viajar 130 millones de años, llegaron con menos de dos segundos de diferencia. Esto ratificó la teoría de Einstein acerca de que las ondas gravitacionales viajan a la velocidad de la luz.

Pero descubrimos más cosas. Como podíamos localizar la señal, los astrónomos miraron en esa área que podíamos localizar con los tres detectores, los dos de LIGO y el de Virgo, y se dedicaron a buscar galaxias, porque saben qué galaxias están a esa distancia. Y en una de esas galaxias, encontraron un puntito brillante que no había estado allí en la última foto de esa galaxia que se había obtenido unos 20 días antes. Ese puntito era primero azul y después rojo, y después también se vio luz en el infrarrojo y en el ultravioleta, y después de 10 días, se midieron desde el mismo puntito, ondas de radio y ondas de rayos X. Todo proveniente de ese mismo puntito en el cielo. Eso fue identificado por decenas de telescopios en todo el mundo. Eran dos estrellas de neutrones girando una alrededor de la otra, bailando el tango, generando ondas gravitacionales, cuando

colisionaron produjeron este rayo gamma, después los rayos electromagnéticos y luego esta onda de choque que produjo los rayos X y las ondas de radio.

Estas ondas de radio y de rayos X, se midieron casi un año después del 17 de agosto del 2017. Es decir, era el verano del 2018 y todavía había ondas llegando del mismo lugar. Esto explicó un misterio de la Astrofísica sobre los rayos gamma cortos. Los estallidos de rayos gamma se clasifican en cortos y largos. Los largos duran más de dos segundos. Sabemos que se originan en supernovas. Los estallidos de rayos gamma cortos, de menos de dos segundos, se pensaba que provenían de colisiones de estrellas de neutrones, teoría que ha quedado confirmada. Para los astrofísicos esto fue lo más importante. Para otros astrofísicos y la prensa, lo más importante fue que se explicó el origen del oro. Carl Sagan decía que "todos somos polvo de estrellas". Eso es porque los elementos que nos forman, los elementos de la vida, los elementos de la tabla periódica, se forman en las estrellas y cuando las estrellas estallan, ese polvo de estrellas es el que se esparce por el resto del Universo y es el carbono y estos elementos los que nos componen. Ello explica la mitad superior de la tabla periódica. En las estrellas no se forman los elementos más pesados, los que tienen más neutrones en los núcleos, esos son los elementos en la mitad inferior de la tabla periódica.

Esos elementos pesados, que incluyen el oro y el platino, no se forman naturalmente en las estrellas, pero se pueden formar cuando átomos chocan unos contra otros y forman átomos más pesados. Pero eso tiene que pasar en colisiones con muy alta energía. ¿Y cuándo pasa eso? En supernovas, pero las supernovas no alcanzan para explicar la abundancia de oro ni en la Tierra, ni en el Sol, ni en las estrellas. La explicación alternativa

era que la abundancia de oro se producía en la colisión de estrellas de neutrones. Así que hemos explicado el origen del oro.

Presente y futuro

El 1 de abril de 2019 hemos iniciado una nueva campaña de datos que se prolongará durante un año. Kagra, el proyecto japonés, probablemente empiece a tomar datos para nosotros cerca del final de esta tercera campaña. Después nos tomaremos un tiempo para mejorar la sensibilidad y tomar datos de nuevo. Nos habíamos pasado décadas esperando la primera onda gravitacional, trabajando para esa primera detección de onda gravitacional y ahora nos preocupa que transcurran tres semanas sin detectar una. Pero estamos detectando bastantes. Vamos a tener un catálogo de colisiones de agujeros negros. Esperamos tener alguna otra colisión de estrellas de neutrones con ondas electromagnéticas, aunque es difícil que pasen las dos juntas.

El futuro es muy brillante. Brillante en el sentido gravitatorio. Estamos esperando medir no solo señales producidas por colisiones de sistemas binarios, sino algunas señales temporarias, como la explosión de una supernova o algún sistema desconocido. Eso es lo que más me entusiasmaría, tener una colisión de la cual no sepamos de dónde viene o qué la produjo. Misterios así, aparecen todos los años en la Ciencia. Esperamos medir señales periódicas. Y cuando tengamos mucha sensibilidad esperamos ver ruido astrofísico de todas estas colisiones de sistemas binarios de estrellas, que son tantas, una arriba de la otra, que no las podemos distinguir y forman un ruido estocástico, un ruido astrofísico.

Los detectores que usamos actualmente

son los denominados terrestres. Pueden detectar ondas gravitacionales que tienen 100 ciclos por segundo, 100 Hz. Esperamos llegar a tener sensibilidad de 10 Hz para poder medir masas más grandes de agujeros negros. Pero si los agujeros negros son muy grandes, como los millones de masas solares que están en el centro de las galaxias, necesitamos detectores muchísimos más largos, porque las longitudes de ondas son mucho más grandes, para eso hay un detector espacial con tres satélites que están a dos millones y medio de distancia, unos de otros, con un láser. El láser va, no vuelve, no rebota en un espejo pero va, genera una señal allí y otro láser emite una señal sincronizada, volviendo a este para poder medir las distancias entre los satélites. Con ese vamos a poder medir colisiones de agujeros negros masivos, colisiones de galaxias, este proyecto se llama LISA, está financiado por la Agencia Espacial Europea y va a lanzarse al espacio en el 2034.

Hay tres colaboraciones, una europea, una norteamericana y una australiana, que también colaboran entre ellos, tratando de encontrar estas ondas gravitacionales. Y esa, probablemente, se detecte antes de que LISA vuele. También esperamos ver ondas gravitacionales o, por lo menos, evidencia de ondas gravitacionales generadas al principio del Universo. Las señales más tempranas que tenemos del Universo son las señales en el espectro cósmico de microondas. Ese espectro cósmico es un espectro electromagnético, pero las ondas gravitacionales que existían en ese momento, polarizaban estos fotones, polarizaban estas ondas electromagnéticas de manera especial. Si medimos la polarización de las ondas de microondas llegando a la Tierra, podemos ver, como si fuera una fotografía, una señal digital de la onda gravitacional en ese momento del principio del Universo.

Bio



GABRIELA GONZÁLEZ

Es profesora de Física y Astronomía en la Universidad Estatal de Luisiana, dedicada a la búsqueda de ondas gravitacionales con el equipo de LIGO. Nació en Córdoba, Argentina, se licenció en Física en la Universidad Nacional de Córdoba, y terminó su doctorado en la Universidad de Syracuse, en EE.UU., en 1995. Trabajó en el MIT y en la Universidad Estatal de Pennsylvania antes de trasladarse a Luisiana en 2001, donde es profesora actualmente. Debido a sus contribuciones, al descubrimiento de ondas gravitacionales, ha recibido reconocimiento de la Academia Nacional de Ciencias de EE.UU., de la Academia Americana de Artes y Ciencias, de la Cámara de Senadores de Argentina, el gobierno provincial de Córdoba y municipal de la ciudad de Córdoba, así como de la Asociación Americana de Física y de la Asociación Americana de Astronomía.

Todo esto es lo que llamamos astronomía de ondas gravitacionales y está pasando ya, estamos tomando datos para detectar estas ondas gravitacionales. Y de aquí a más, aún en la Tierra, vamos a tener mejores detectores, ya tenemos ideas para construir detectores de diez kilómetros de largo para ver agujeros negros más grandes, más lejos, para ver más estrellas de neutrones, estrellas de neutrones que también están mucho más lejos; para ver si los primeros agujeros negros eran distintos de los agujeros negros que se formaron más tarde, ver la historia de las estrellas de neutrones y de los agujeros negros.