ONDAS GRAVITACIONALES: UNA DÉCADA EXPLORANDO EL UNIVERSO

Alicia Sintes

El 14 de septiembre de 2015 se produjo un acontecimiento histórico para la física y la astronomía: por primera vez se detectaron directamente ondas gravitacionales. La señal llegó a los dos observatorios estadounidenses de LIGO, Hanford y Livingston, y duró menos de dos décimas de segundo. Procedía de la fusión de dos agujeros negros que habían orbitado uno alrededor del otro durante millones de años, hasta precipitarse en una colisión final. La radiación emitida había viajado unos 1.300 millones de años antes de alcanzar la Tierra.

La detección fue posible gracias a instrumentos de una sensibilidad extraordinaria, capaces de registrar variaciones diminutas en la distancia entre espejos separados por kilómetros. Aquella observación supuso, al mismo tiempo, la primera detección directa de ondas gravitacionales, la primera observación de una fusión de agujeros negros y una prueba de la relatividad general en condiciones de gravedad intensa. Los objetos originales tenían masas superiores a treinta veces la del Sol y se desplazaban a velocidades próximas al 60 % de la velocidad de la luz en las etapas finales de su encuentro. La deformación relativa del espacio-tiempo medida en la Tierra fue del orden de 10^{-21}.

Con este descubrimiento se abrió una ventana de observación completamente nueva. A lo largo de la historia, cada nueva región del espectro electromagnético ha permitido descubrir fenómenos antes desconocidos. Las ondas gravitacionales van aún más allá: no constituyen otra banda de luz, sino un mensajero físico distinto y complementario, capaz de revelarnos acontecimientos que no siempre pueden estudiarse mediante radiación electromagnética.

Qué son las ondas gravitacionales y qué información transportan

Las ondas gravitacionales son perturbaciones de la geometría del espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Se generan cuando grandes distribuciones de masa experimentan movimientos acelerados y cambiantes, como sucede en las parejas de objetos compactos que se aproximan y fusionan. A diferencia de la luz, interactúan muy débilmente con la materia y prácticamente no sufren absorción ni dispersión durante su recorrido, aunque sí pueden verse afectadas por lentes gravitacionales.

Al atravesar una región, una onda gravitacional produce una deformación de marea: las distancias se alargan en una dirección mientras se acortan en otra, alternando de forma característica. Al igual que la luz, presenta dos polarizaciones. Los detectores responden a la amplitud de esa deformación, que disminuye aproximadamente de forma inversamente proporcional a la distancia. Por eso las ondas gravitacionales también pueden utilizarse para medir distancias cosmológicas.

Las frecuencias de emisión dependen fundamentalmente de la masa y la compacidad de los sistemas. Los objetos más masivos emiten señales características a frecuencias más bajas, mientras que los más compactos pueden alcanzar frecuencias mayores. Los interferómetros terrestres observan principalmente desde unos pocos hercios hasta varios kilohercios, una banda adecuada para estudiar agujeros negros y estrellas de neutrones de masas estelares. Los agujeros negros supermasivos requieren instrumentos capaces de detectar frecuencias mucho menores.

Esta nueva astronomía tiene dos grandes desafíos: detectar señales extraordinariamente débiles y descifrar la información que contienen. Con ellas podemos estudiar cómo se forman los agujeros negros, qué sucede en las fusiones de estrellas de neutrones, cómo se comporta la materia sometida a presiones extremas y hasta qué punto la relatividad general describe correctamente la gravedad. En el futuro podrían proporcionar pistas sobre etapas muy tempranas del universo.

Cómo medir deformaciones inferiores al tamaño de un protón

Para comprender la dificultad experimental, consideremos la fusión de dos estrellas de neutrones a unos cien millones de años luz. Una onda relativamente intensa produciría en la Tierra una deformación fraccional del orden de 10^{-22}. Si imagináramos la distancia entre el Sol y Saturno, su variación sería comparable al tamaño de un átomo de hidrógeno. Sin embargo, queremos medir ese efecto utilizando aparatos cuyos brazos tienen apenas unos kilómetros: eso obliga a detectar cambios de longitud del orden de 10^{-18} o 10^{-19} metros.

La técnica fundamental es la interferometría láser. Un haz de luz se divide y recorre dos brazos perpendiculares; después se refleja en espejos y vuelve a recombinarse. El interferómetro se ajusta de manera que, en ausencia de perturbaciones, la interferencia en la salida sea prácticamente destructiva. Si una onda gravitacional modifica ligeramente las longitudes relativas de los brazos, cambia la interferencia y aparece una señal luminosa medible.

El principio recuerda a un interferómetro de Michelson, pero los observatorios reales son mucho más complejos. Emplean láseres de alta potencia, cavidades ópticas Fabry-Pérot que hacen rebotar la luz muchas veces, sistemas de reciclaje de potencia y señal, técnicas cuánticas de reducción del ruido y grandes conductos en condiciones de alto vacío. Los espejos, de decenas de kilogramos, están suspendidos mediante sofisticados sistemas de péndulos y aislamiento sísmico para minimizar las vibraciones procedentes del entorno.

La sensibilidad está limitada por diversas fuentes de ruido. El ruido cuántico está relacionado con la naturaleza estadística de la luz; el ruido térmico, con las vibraciones microscópicas de los espejos y sus suspensiones; y a bajas frecuencias aparecen el ruido sísmico y las fluctuaciones del campo gravitatorio local. A ello se añaden ruidos técnicos, electrónicos, acústicos y de alineamiento. Por este motivo, los observatorios están rodeados de sensores ambientales e instrumentales que permiten distinguir las perturbaciones reales de las interferencias.

Una red mundial y un esfuerzo científico colectivo

Los dos detectores LIGO de Estados Unidos tienen brazos de cuatro kilómetros. A ellos se suma Virgo, cerca de Pisa, con brazos de tres kilómetros, y KAGRA, en Japón, además de los proyectos de ampliación de la red, como LIGO-India. También ha contribuido a este campo el interferómetro GEO600. Observar una misma señal con varios instrumentos aumenta la confianza en su detección y permite determinar mejor la región del cielo de la que procede.

La investigación en ondas gravitacionales es un ejemplo de ciencia a gran escala. No solo requiere especialistas en relatividad y astrofísica, sino también en óptica, electrónica, control, informática, análisis estadístico, ingeniería y gestión de datos. Las colaboraciones reúnen a miles de investigadores y técnicos. Además de construir y mantener los instrumentos, es imprescindible asegurar la calidad de los datos, distribuirlos, analizarlos y desarrollar modelos teóricos con los que interpretarlos.

Los sucesivos periodos de observación han ido acompañados de mejoras de sensibilidad. Aun así, las curvas de ruido muestran componentes que todavía no comprendemos completamente.

Identificarlas y reducirlas es una tarea permanente: cuanto más baja sea la amplitud del ruido instrumental, más lejos podremos observar y más fenómenos podremos detectar.

Cómo se identifican las señales: modelos, ruido y supercomputación

Para buscar muchas de las señales se utiliza una técnica denominada filtrado adaptado, o matched filtering. Consiste en comparar los datos del detector con un catálogo muy amplio de formas de onda calculadas teóricamente. Es parecido a reconocer una canción a partir de una grabación: cuanto más fiel sea la plantilla, más posibilidades tenemos de identificar una señal débil y estimar los parámetros físicos de su fuente.

El problema es que los datos no son limpios. Aparecen perturbaciones breves, llamadas glitches, que en ocasiones son incluso más intensas que la señal astrofísica. En la primera detección de una fusión de estrellas de neutrones fue necesario tratar una de estas interferencias para estudiar adecuadamente el evento. La iniciativa de ciencia ciudadana Gravity Spy permite colaborar en la clasificación de distintos tipos de ruido instrumental.

En ocasiones, las causas son sorprendentes. Se han identificado perturbaciones asociadas incluso a aves que picoteaban hielo en elementos externos de una instalación. Estos ejemplos recuerdan que los observatorios son instrumentos extraordinariamente sensibles al entorno y que cualquier fenómeno local puede dejar una huella en los datos.

La elaboración de plantillas precisas exige resolver, mediante métodos numéricos, las ecuaciones de Einstein en situaciones muy complejas, como la fusión de dos agujeros negros. Para ello se necesitan grandes recursos de cálculo y superordenadores como MareNostrum. La simulación, la búsqueda estadística y la interpretación física forman parte de un mismo proceso científico.

La astronomía multimensajero: dos estrellas de neutrones y una kilonova

Uno de los momentos más importantes llegó en 2017, cuando se observó la fusión de dos estrellas de neutrones mediante ondas gravitacionales y, aproximadamente 1,7 segundos después, un estallido de rayos gamma asociado al mismo acontecimiento. La localización de la fuente permitió organizar una campaña internacional de observación con telescopios de muy distintas longitudes de onda. Tras esperar a que anocheciera en Chile, se identificó un nuevo punto luminoso en una galaxia que no aparecía en imágenes anteriores.

Este episodio demostró el enorme valor de la astronomía multimensajero. Las ondas gravitacionales aportan información sobre la dinámica y las masas del sistema; la luz y otras señales permiten estudiar su entorno, los materiales expulsados y la evolución del fenómeno. La combinación de observaciones confirmó que algunas explosiones breves de rayos gamma están asociadas a fusiones de estrellas de neutrones.

El seguimiento también reveló una kilonova, un resplandor alimentado por la desintegración radiactiva de elementos pesados recién sintetizados. Las fusiones de estrellas de neutrones constituyen así uno de los escenarios fundamentales para explicar el origen de una parte importante de los elementos más pesados del universo. Asimismo, los datos permitieron estudiar la relación entre masa y radio de las estrellas de neutrones y obtener restricciones sobre el comportamiento de la materia en su interior.

Además, la señal gravitacional proporcionó una estimación de la distancia a la fuente, mientras que las observaciones electromagnéticas permitieron medir el desplazamiento al rojo de su galaxia. Con ambos datos pudo obtenerse una estimación independiente de la constante de

Hubble. Su incertidumbre sigue siendo grande, pero el método abre una vía muy prometedora para la cosmología.

Qué hemos aprendido sobre los agujeros negros

Antes de las primeras detecciones se esperaba observar un número importante de fusiones de estrellas de neutrones, pero no se sabía cuántas parejas de agujeros negros serían detectables. Tampoco se esperaba encontrar con tanta frecuencia agujeros negros de masas elevadas ni objetos situados en intervalos de masa que los modelos de evolución estelar consideraban poco probables.

Las observaciones han cambiado ese panorama. Se han detectado numerosas fusiones de agujeros negros, sistemas mixtos de agujero negro y estrella de neutrones, y objetos compactos con masas situadas en la denominada brecha de masas bajas, alrededor de dos o tres masas solares. También se han encontrado componentes en la región de masas donde la inestabilidad de pares dificulta la formación directa de agujeros negros a partir de una estrella.

Un caso especialmente llamativo fue la fusión de dos agujeros negros de unas 85 y 66 masas solares, que produjo un remanente cercano a las 150 masas solares. Esto nos introduce en el territorio de los agujeros negros de masa intermedia, una población importante para comprender cómo pueden crecer los agujeros negros hasta alcanzar las enormes masas de los que habitan los centros galácticos. Una posible explicación es que algunos objetos ya procedieran de fusiones anteriores: serían agujeros negros de segunda generación.

Las diferencias de masa entre los componentes, sus velocidades de rotación y la orientación de sus ejes también aportan información. Si dos estrellas nacen y evolucionan juntas en un sistema binario, se esperan determinadas relaciones entre sus giros y el movimiento orbital. En cambio, las rotaciones desalineadas, las órbitas excéntricas o las relaciones de masa extremas sugieren en algunos casos encuentros y capturas en entornos estelares muy densos.

El cuarto periodo de observación y los eventos más destacados

El cuarto periodo de observación, denominado O4, comenzó en mayo de 2023 y concluyó, según los datos presentados en la conferencia, en noviembre de 2025. Se organizó en distintas fases y permitió aumentar considerablemente el catálogo de señales. En la exposición se mencionaron unos 390 eventos hasta O4b y al menos 68 adicionales en O4c, así como centenares de candidatos sujetos a distintos umbrales de significación estadística.

Las alertas automáticas han mejorado notablemente: en la mayoría de los casos citados se distribuyeron en menos de treinta segundos, acompañadas de una localización preliminar en el cielo y de probabilidades sobre la naturaleza del sistema. Esta rapidez es fundamental para que otros observatorios intenten buscar una posible contrapartida electromagnética. Una parte de los datos y de las herramientas de análisis se publica abiertamente y se organizan talleres para facilitar su utilización.

Entre los acontecimientos destacados figura una fusión de objetos de unas 137 y 103 masas solares, con un remanente estimado en unas 225 masas solares, que vuelve a plantear preguntas sobre el crecimiento jerárquico de los agujeros negros. En conjunto, las detecciones han permitido empezar a reconstruir la distribución de masas y rotaciones de estas poblaciones, así como identificar objetos que los modelos tradicionales no preveían con facilidad.

La conferencia también destacó una señal especialmente intensa, recibida el 14 de enero de 2025, cuyos componentes recordaban a los de la primera detección de 2015. Una década de mejoras instrumentales permitió estudiarla con mucha mayor precisión y contrastar el teorema del área de Hawking, según el cual el área total de los horizontes de sucesos no debe disminuir en una fusión. Los resultados fueron compatibles con esa predicción.

Más allá de las fusiones: estrellas de neutrones, materia oscura y fondos gravitacionales

No toda la investigación se centra en señales transitorias de fusiones. También se buscan ondas gravitacionales continuas procedentes de estrellas de neutrones en rotación. Si una de estas estrellas presenta una deformación mínima y gira, puede emitir una señal muy débil, pero persistente, que se acumula durante largos periodos de observación.

En algunos púlsares conocidos, los límites obtenidos para la amplitud de emisión son del orden de 10^{-27}. Las deformaciones físicas implicadas son extraordinariamente pequeñas: para ciertos objetos, los límites de elipticidad se traducen en irregularidades de apenas unas decenas o centenares de micrómetros sobre un cuerpo de unos diez kilómetros de radio. Detectar estas ondas permitiría estudiar la estructura interna de las estrellas de neutrones y la ecuación de estado de la materia a densidades extremas.

Los interferómetros también pueden buscar fenómenos relacionados con candidatos a materia oscura. Algunas partículas hipotéticas podrían producir perturbaciones directas en los espejos; otras teorías predicen nubes de bosones alrededor de agujeros negros o señales asociadas a agujeros negros primordiales. Aunque no se hayan detectado, la ausencia de señales permite excluir determinadas combinaciones de masas y propiedades físicas.

Otra línea de investigación es el fondo estocástico de ondas gravitacionales: la superposición de innumerables fuentes que no se distinguen individualmente. Es probable que el primer fondo detectable con estos instrumentos sea de origen astrofísico, producido por muchas fusiones de objetos compactos. Un fondo primordial, procedente de procesos del universo temprano, tendría un valor cosmológico excepcional.

Los observatorios del futuro: Einstein Telescope, Cosmic Explorer y LISA

Los detectores actuales apenas nos han permitido explorar una pequeña parte del universo accesible mediante ondas gravitacionales. Los proyectos de tercera generación, como Cosmic Explorer en Estados Unidos y Einstein Telescope en Europa, pretenden reducir el ruido y mejorar la sensibilidad en torno a un orden de magnitud, además de ampliar el acceso a frecuencias más bajas. Cosmic Explorer contempla instalaciones con brazos de decenas de kilómetros; para Einstein Telescope se estudian configuraciones subterráneas.

Una mejora de sensibilidad de ese calibre transformaría el volumen de universo observable y multiplicaría las detecciones. En lugar de unos pocos eventos por semana, podrían llegar a registrarse miles al día. Esto permitiría estudiar poblaciones enteras de agujeros negros y estrellas de neutrones, realizar pruebas de precisión de la gravedad y enviar alertas antes de que algunas fusiones culminen. También surgirían nuevos problemas: las señales se superpondrían con frecuencia y harían falta modelos y procedimientos de análisis mucho más potentes.

La misión espacial LISA, impulsada por la Agencia Espacial Europea, abordará una región de frecuencias mucho más bajas. Estará formada por tres naves separadas aproximadamente 2,5

millones de kilómetros, capaces de medir perturbaciones asociadas, entre otros fenómenos, a agujeros negros supermasivos. La observación desde el espacio complementará de forma decisiva a los interferómetros terrestres.

Existe además otra técnica que utiliza púlsares como relojes naturales. Midiendo con radiotelescopios la llegada de sus pulsos durante años, las redes de cronometraje de púlsares —pulsar timing arrays— buscan las variaciones correlacionadas que producirían ondas gravitacionales de frecuencias extremadamente bajas. En 2023 varias colaboraciones anunciaron evidencias de un fondo común compatible con este tipo de señal. Entre los instrumentos terrestres, LISA y las redes de púlsares, la astronomía gravitacional podrá estudiar fenómenos en escalas temporales y de masa muy diferentes.

Conclusiones

En apenas una década, la observación directa de ondas gravitacionales ha transformado nuestra visión del universo. Hemos descubierto una población mucho más rica de agujeros negros de lo que se esperaba, hemos observado la fusión de estrellas de neutrones junto con su emisión luminosa y hemos comenzado a utilizar estas señales para estudiar la gravedad, la materia extrema y la expansión cósmica.

Lo más estimulante es que estamos en los comienzos. Los futuros observatorios permitirán investigar con una precisión inédita las preguntas que ya conocemos, pero también descubrir fenómenos que todavía no somos capaces de imaginar.

Preguntas

¿La constante de Hubble obtenida mediante ondas gravitacionales favorece alguno de los dos valores actualmente en tensión?

El valor más probable obtenido con la fusión de estrellas de neutrones queda aproximadamente entre las dos estimaciones en tensión, pero la incertidumbre es todavía demasiado grande para decidir entre ellas. El método combina la distancia obtenida de la señal gravitacional con el desplazamiento al rojo de una galaxia identificada; también pueden utilizarse métodos estadísticos con catálogos de galaxias cuando no se identifica una contrapartida luminosa.

¿Por qué encontramos tantas parejas de agujeros negros y cómo pueden formarse?

Hay más agujeros negros de los que se esperaba y pueden formarse parejas por distintos mecanismos. Algunas proceden de sistemas estelares binarios que evolucionan conjuntamente. Otras podrían originarse mediante encuentros y capturas en entornos muy densos. Las rotaciones desalineadas y ciertas excentricidades orbitales son indicios de una historia dinámica más compleja, con posibles interacciones múltiples y fusiones anteriores.

¿Cómo se determinan las masas de los agujeros negros y las estrellas de neutrones?

La forma de la onda gravitacional depende de las masas, los giros y otros parámetros del sistema. Se comparan los datos observados con modelos teóricos calculados para diferentes combinaciones de esos valores. La forma temporal y frecuencial permite inferir las propiedades de los cuerpos; la amplitud, junto con el resto de parámetros, aporta información sobre la distancia.

¿La masa del objeto final equivale a la suma de las masas de los dos objetos iniciales?

No. Durante la aproximación y, especialmente, en la fusión, el sistema pierde energía en forma de ondas gravitacionales. Por la equivalencia entre masa y energía, el objeto final tiene una masa inferior a la suma de las masas iniciales. En algunos eventos, la energía radiada equivale a varias masas solares.

¿Hasta qué punto las teorías físicas describen la realidad? ¿Son compatibles la relatividad general y la mecánica cuántica?

Cada teoría describe con gran precisión los fenómenos de su ámbito de aplicación. La mecánica newtoniana resulta suficiente en muchas situaciones cotidianas; la relatividad es indispensable, por ejemplo, para corregir los relojes del sistema GPS; y la mecánica cuántica explica multitud de fenómenos microscópicos y aplicaciones tecnológicas. Sin embargo, todavía no disponemos de una descripción completa que unifique la gravedad y la física cuántica en todas las escalas, especialmente cerca de las condiciones extremas del universo primitivo.

¿Cómo se separarán las señales cuando se superpongan, especialmente con LISA y los detectores futuros?

En los detectores terrestres actuales, los eventos suelen ser breves y relativamente espaciados. Con los instrumentos de tercera generación habrá muchas más señales simultáneas. En LISA, además, numerosas binarias galácticas producirán un fondo de señales que se superponen; algunas fuentes conocidas podrán utilizarse como referencias de calibración. Se están desarrollando métodos capaces de identificar y ajustar múltiples señales a la vez.

¿Cuál es actualmente la mayor limitación para avanzar en la investigación de las ondas gravitacionales?

La financiación. La ponente resumió así, de forma deliberadamente breve, la necesidad de recursos económicos para desarrollar y mantener instrumentos cada vez más ambiciosos.