

# Ondas gravitacionales: mensajeras del universo

Gabriela González y Alicia M. Sintés

© NASA/C. Henze

**E**l siglo pasado ha sido testigo de enormes avances en nuestra comprensión del universo. Hemos llegado muy lejos usando la radiación electromagnética como herramienta para observar el universo. Por ejemplo, la astronomía óptica ha probado que el universo se expande. La radio-astronomía nos ha dado el fondo de radiación cósmico, los chorros de rayos alimentados por agujeros negros en los núcleos galácticos y el descubrimiento de estrellas de neutrones en forma de púlsares. La astronomía de rayos X nos ha dado la interacción entre estrellas de neutrones y agujeros negros. Los rayos infrarrojos nos han dado evidencia de la existencia de agujeros negros supermasivos en el núcleo de nuestra propia galaxia. Sin embargo, la gravedad es el motor de muchos de los procesos en el universo y gran parte de su acción es invisible a la radiación electromagnética. Si la radiación electromagnética nos aporta los ojos con los que ver el universo, la radiación gravitatoria nos proporciona los oídos con los que escucharlo. En estos momentos aún estamos sordos ante estos susurros en forma de ondas gravitacionales del universo. Pero en los próximos años habrá una red ultra-sensible de detectores terrestres que se complementarán con observatorios espaciales dispuestos a oír este universo gravitacional, que cubrirán un rango de frecuencias entre los nanohercios hasta varias decenas de kilohercios, y que inevitablemente descubrirán fenómenos totalmente inesperados, mientras que profundizarán en los fenómenos astrofísicos conocidos. Las ondas gravitacionales son nuevos mensajeros que nos permitirán abrir una nueva ventana al cosmos que podría revolucionar la comprensión del universo en que vivimos.

## El papel de la relatividad general

En 1905, Albert Einstein publicó una serie de artículos en los que se cuestionaba la propia naturaleza del espacio y del tiempo de la física clásica. Estos demostraron la existencia de moléculas como entidades físicas, pusieron en marcha el pensamiento que dio lugar a la mecánica cuántica y sentaron las bases de la teoría de la relatividad especial. Luego se pasó la siguiente década desarrollando su teoría de la *relatividad general* [1]. En esta nueva teoría, la gravitación es el resultado de la deformación del espacio-tiempo producida por la presencia de materia y energía, es decir que el espacio deja de ser ese marco inalterable y uniforme en el que se sitúan los objetos y suceden los fenómenos. El desarrollo de esta nueva teoría nos lleva a la conclusión de que el espacio-tiempo

puede ser objeto de investigación empírica, al igual que lo son los átomos, las moléculas o el campo electromagnético. Esta nueva teoría de la gravitación es uno de los logros más imponentes de la física del siglo veinte y es la teoría que actualmente nos da la mejor descripción del universo.

La existencia de la radiación gravitatoria fue predicha por Einstein en 1916 [2, 3], como una de las consecuencias importantes de su nueva teoría de la relatividad general, aunque él creía que no serían físicamente detectables. Su derivación inicial fue mediante el estudio de fenómenos dentro del marco de su teoría linealizada. Sin embargo, debido a la complejidad física y matemática de la teoría de la relatividad general, en un principio se cuestionó si estas ondas gravitacionales describían fenómenos físicos reales o simplemente eran efectos de coordenadas. No fue hasta la década de los 1950, gracias a Pirani, Feynman, Bondi y posteriormente Isaacson, en que se entendió la naturaleza física de las ondas gravitacionales e interpretada como grados de libertad que llevan consigo energía.

La energía en ondas gravitacionales perdida por un sistema binario de estrellas produce que las estrellas se acerquen, y esto fue comprobado cuando Hulse y Taylor descubrieron en los setenta el primer púlsar en un sistema binario PSR B1913+16 [4]. Mediciones precisas durante los siguientes 40 años han mostrado acuerdo con la teoría de Einstein, con una precisión relativa del 0.2 %. Por este descubrimiento Hulse y Taylor recibieron el premio Nobel de Física en 1993.

Según la teoría de la relatividad general, cualquier cuerpo acelerado de forma no esféricamente simétrica produce un cambio en el campo gravitatorio que se propaga en el universo a la velocidad de la luz de igual modo que las ondas electromagnéticas se crean por cargas en movimiento. Las ondas gravitacionales son estas distorsiones del espacio-tiempo que llevan consigo información sobre sus orígenes. Debido a que la gravedad es la más débil de las cuatro interacciones fundamentales, las ondas gravitacionales interactúan muy débilmente con la materia. Estas prácticamente no pueden ser absorbidas, desviadas ni apantalladas, cosa que ha imposibilitado hasta ahora su observación directa, pero a la vez les permite viajar sin ser distorsionadas a lo largo de distancias cosmológicas. Puesto que el universo ya era transparente a la gravedad momentos después del Big Bang y mucho antes de serlo a la luz, las ondas gravitacionales nos permitirán observar la historia del universo hasta instantes muy remotos, e incluso nos podrían decir cómo

era el universo cuando tenía menos de un segundo, cosa completamente imposible con los telescopios convencionales. Eventos cataclísmicos en el universo, dos estrellas de neutrones fundiéndose en un agujero negro, colisiones de galaxias con agujeros negros masivos en su centro o estrellas explotando en supernovas emiten ondas gravitacionales que, cuando se detecten, proveerán información prístina sobre las estrellas masivas en el universo.

Las ondas gravitacionales no son simplemente una nueva banda, son todo un nuevo espectro con propiedades diferentes y complementarias a las ondas electromagnéticas. El efecto que producen es una compresión fraccional del espacio-tiempo perpendicular a la dirección de propagación, con una amplitud  $h = \Delta L/L$  pequeñísima, dependiendo del origen de las ondas y la distancia a la que se observen. Expresado en términos físicos, una onda gravitacional intensa emitida por la colisión de dos estrellas de neutrones produciría en la Tierra distorsiones en una distancia de 10 kilómetros del orden de  $10^{-18}$  metros —una cantidad 1 000 veces más pequeña que el diámetro del protón—. Como esta clase de sistemas son poco frecuentes, este tipo de fuentes se han de buscar a distancias de millones de años luz, sucediendo en galaxias lejos de la Vía Láctea. Por tanto, la búsqueda de ondas gravitacionales implica intentar hallar los minúsculos efectos de algunos de los sistemas astrofísicos más energéticos en las profundidades del universo.

### Los detectores terrestres

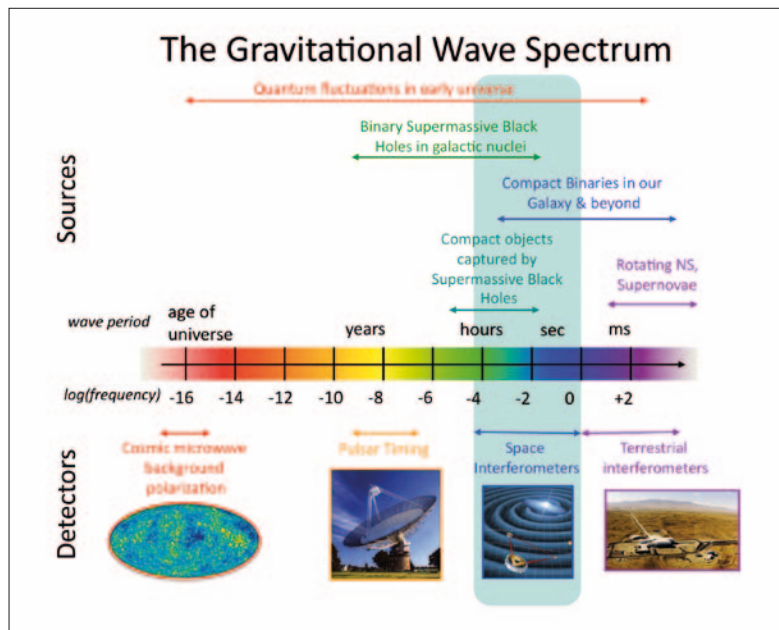
La construcción de un detector de ondas gravitacionales supone un gran reto tecnológico y tal empresa no comenzó hasta los años sesenta con el trabajo pionero de Joseph Weber en detectores resonantes [5]. En los noventa cinco barras criogénicas ALLEGRO, AURIGA, EXPLORER NAUTILUS y NIOBE estuvieron en operación de forma continuada, aunque hoy en día sólo dos (AURIGA y NAUTILUS) siguen operando, y también existen prototipos de detectores esféricos: MiniGRAIL y Mario Schenberg. En paralelo con el desarrollo de estos detectores resonantes ultracriogénicos, cuya sensibilidad se vio limitada, ya en los años sesenta se empezó a considerar la utilización de luz láser, tanto en Europa como en Estados Unidos. Estos detectores son básicamente interferómetros del tipo Michelson-Morley dispuestos en forma de L y el concepto de funcionamiento es relativamente simple: cuando una onda gravitacional incide perpendicularmente al plano del detector produce cambios cuadrupolares en la longitud de los brazos del interferómetro, de forma que mientras uno se acorta el otro se alarga y viceversa. Estos cambios dan lugar a interferencias medidas con fotodetectores, de las cuales se puede inferir el patrón de las ondas gravitacionales que han atravesado el detector.

En los noventa comenzó la construcción de los detectores interferométricos terrestres: LIGO en

Estados Unidos con un observatorio en Hanford (Washington) y otro en Livingston (Louisiana), Virgo en Italia, GEO600 en Alemania y TAMA en Japón. La red de detectores kilométricos con LIGO, GEO y Virgo estuvo operando entre los años 2005-2011, cubriendo la banda de frecuencias entre 50 Hz y 3 kHz. Estos detectores tuvieron una precisión sin precedentes a fluctuaciones del espacio-tiempo, con sensibilidad suficiente para detectar señales de agujeros negros formados a 60 millones de años luz. Esto fue el resultado de grandes innovaciones tecnológicas en campos diversos, usando láseres infrarrojos de gran estabilidad, espejos masivos con superficies pulidas con precisión única para su tamaño, suspendidos en complejos sistemas de aislamiento sísmico del movimiento de la superficie terrestre. Los interferómetros están instalados en sistemas de ultra-vacío, que se mantienen continuamente. La tecnología usada fue en muchas instancias desarrollada por la industria por primera vez para estos detectores, moviendo la frontera de lo que es posible para instrumentos de precisión, y para otras aplicaciones.

Los datos obtenidos en 2005-2010 fueron analizados cuidadosamente, sin hallar evidencias de ondas gravitacionales. Esto era esperado, porque las expectativas de detección eran pequeñas, derivadas del conocimiento de las estrellas de neutrones en el universo —se estima que se necesita una sensibilidad diez veces mejor para esperar detecciones frecuentes—. Aún así estos esfuerzos han servido para producir nueva ciencia mediante el análisis de las consecuencias de las no detecciones al nivel de sensibilidad conseguido. Las observaciones de LIGO y Virgo han puesto límites a la densidad de energía almacenada en el fondo cosmológico de radiación gravitatoria, mejorando los límites impuestos por la teoría de formación de elementos primordiales. A veces la ausencia de ondas gravitacionales también nos da información importante: se observaron algunas intensas explosiones de rayos gamma que se supone se originan en la coalescencia de estrellas de neutrones; al no observar ondas gravitacionales simultáneamente, sabemos que los orígenes de los rayos gamma están muy lejos, fuera del horizonte de los detectores.

No todas las ondas gravitacionales son producidas por eventos violentos extra-galácticos: estrellas de neutrones con desviaciones de la esfericidad producen ondas gravitacionales periódicas. Es de destacar el estudio de púlsares como los que hay en las constelaciones de Cangrejo y Vela. La frecuencia rotacional de estos púlsares disminuye con el tiempo. LIGO y Virgo han sido capaces de limitar a un 1 % y 10 %, respectivamente, la contribución a la pérdida de energía en forma de radiación gravitatoria, lo cual indica que estas estrellas tienen pequeñísimas diferencias con esferas perfectas. En los datos de detectores se podrían esconder indicios de estrellas rotantes en la galaxia de las que no



<http://science.gsfc.nasa.gov/663/images/gravity/GWspec.jpg>

recibimos señales electromagnéticas, pero generarían ondas gravitacionales. Estas búsquedas computacionales son muy costosas, por lo que la mejor manera de realizarlas es usando miles de computadoras de voluntarios que donan sus ciclos: este proyecto se llama Einstein@home —todos están invitados a contribuir al descubrimiento de estas señales (para más información sobre los resultados astrofísicos obtenidos pueden consultar [6]).

Entrado ya este siglo se han desarrollado los detectores interferométricos de segunda generación, con láseres más potentes, espejos más grandes y mejores, suspendidos de fibras de vidrio en péndulos cuádruples en lugar de péndulos simples suspendidos de fibras de metal, mejor aislamiento sísmico que mide y cancela el movimiento del terreno, topologías más sofisticadas del interferómetro y de los sistemas de detección fotoeléctrica y muchos otros cambios que resultarán en detectores más robustos y más sensibles. La era de los detectores avanzados está a punto de empezar con los detectores avanzados de LIGO (Advanced LIGO), tomando datos este año por 3 meses, aun cuando no se haya alcanzado todavía la óptima sensibilidad diseñada. En 2016, se espera que el detector de Virgo esté listo para unirse a la red de LIGO, y tomar datos por algunos meses, con mayor rango de alcance a eventos astrofísicos. Estos nuevos detectores, sensibles a la banda de frecuencia entre 10 Hz-10 kHz, se esperan que lleguen paulatinamente a su sensibilidad de diseño entre 2016-2020. A ellos se unirá en un futuro el detector japonés KAGRA, que se convertirá en el primer observatorio de ondas gravitacionales subterráneo y criogénico. También se espera que un tercer detector LIGO se instale en la India. Todo ello resultará en una red mundial de detectores con un alcance diez veces superior al de sus predecesores, lo cual equivale a aumentar en tres órdenes de magnitud

el volumen del cosmos que cubrirán, y que nos permitirá “oír” señales a un ritmo mensual o incluso semanal. Advanced LIGO y Virgo serán sensibles a señales provenientes de sistemas binarios de estrellas de neutrones hasta distancias de 200 Mpc (1 Mpc ~ 3 millones de años luz) y a la fusión de agujeros negros estelares a distancias 1 000 veces superior que la distancia a la galaxia Andrómeda, junto con estallidos de rayos gamma, estrellas de neutrones en rotación en nuestra galaxia o incluso fondos astrofísicos de diverso origen. Está clara la necesidad de contar con esta red mundial de detectores y de expandirla añadiendo un detector en el hemisferio sur, para así mejorar la resolución angular, aumentar el tiempo de observación global, poder identificar fuentes y determinar mejor las propiedades de los objetos que las emiten.

### Astronomía de multimensajeros

Se espera que algunas de las fuentes de radiación gravitatoria más energéticas produzcan a su vez suficiente radiación electromagnética como para ser observada desde telescopios espaciales o terrestres. Por ejemplo, las parejas de estrellas de neutrones emiten una gran cantidad de energía de ondas gravitacionales cuando se mueven en espiral una respecto a la otra y, cuando los dos objetos se fusionan, producen material altamente radiactivo. Se cree que los estallidos cortos de rayos gamma, que acompaña a la fusión, provienen de esos chorros de radiación de alta energía expulsados por la fusión de estas estrellas. La observación conjunta de un evento astronómico, tanto con luz como con ondas gravitacionales, sería sin duda uno de los descubrimientos más interesantes de la astronomía moderna. Los dos tipos de ondas son muy diferentes. Las ondas gravitacionales revelan datos sobre el funcionamiento interno de un sistema, mientras que la luz proporciona información acerca de un sistema desde su superficie y su interacción con el entorno. Mediante la observación de una fuente usando ambos tipos de ondas, podemos comparar las señales y obtener un panorama más completo de los procesos astrofísicos ocurridos.

LIGO y Virgo se encuentran totalmente inmersos en esta astronomía de multimensajeros. Ambas colaboraciones tienen firmados memorandos de entendimiento con docenas de diversos observatorios ópticos, rayos X, rayos gamma y neutrinos para recibir y enviar alertas junto con el análisis conjunto de los datos.

### La saga continúa. Las nuevas fronteras

Está clara la necesidad de ir mejorando esta red de detectores terrestres para así maximizar los posibles resultados científicos, tanto en lo que se refiere a hacer pruebas fundamentales de la relatividad general como de las observaciones astrofísicas. Durante los últimos años se han ido desarrollando nuevos enfoques y nuevas tecnolo-

gías para la detección de ondas gravitacionales. En el horizonte está el proyecto europeo Einstein Telescope (ET). ET mejoraría la sensibilidad un orden de magnitud con respecto a los detectores avanzados y extendería el rango de sensibilidad hasta 1 Hz. Esto permitiría explorar los sistemas binarios hasta distancias cosmológicas y explorar una gran variedad de fenómenos. ET sería el ejemplo culminante de más de 40 años de continuo desarrollo de los interferómetros ópticos. En estos momentos se están planteando implementar nuevas tecnologías como, por ejemplo, la interferometría atómica, aún en estudio.

Por otra parte, las observaciones electromagnéticas del universo junto con los modelos teóricos, sugieren que una gran parte del espectro gravitacional es inaccesible a estos detectores terrestres. Por consiguiente es necesario contar con una amplia gama de detectores para explotar todo el potencial de la astronomía de las ondas gravitacionales. Además de los detectores terrestres, se están desarrollando detectores espaciales para cubrir el rango entre 0.1 mHz y 100 mHz. En 2013, la Agencia Espacial Europea (ESA) seleccionó el tema “El universo Gravitacional” propuesto por el Consorcio de eLISA como futura misión L3 de su programa Cosmic Vision para ser lanzada a partir del 2034. La antena espacial eLISA se compone de tres naves espaciales dispuestas en un triángulo equilátero, de un millón de kilómetros de lado, que sigue una órbita heliocéntrica detrás de la Tierra. Sus posiciones relativas serán monitoreadas con interferometría láser de alta precisión, pero utilizando conceptos y tecnología completamente diferente a los detectores terrestres. Debido a esta gran novedad, una misión precursora llamada LISA Pathfinder se encargará de demostrar que se pueden lograr los niveles de exigencia requeridos. El lanzamiento de LISA Pathfinder está previsto para finales de noviembre de 2015.

eLISA es el único proyecto de detector de ondas gravitacionales del que conocemos fuentes garantizadas. Se tratan de los sistemas binarios galácticos ultracompactos, con periodos inferiores a 2 horas, conocidos como binarias de verificación. Además de los sistemas estelares binarios en nuestra galaxia y algunos extra-galácticos, se espera que eLISA observe la colisión de agujeros negros masivos (de  $10^4$ - $10^6$  masas solares) como los que existen en los centros de prácticamente todas las galaxias, la captura y posterior caída orbital de objetos estelares compactos (enanas blancas, estrellas de neutrones, agujeros negros estelares) hacia esos agujeros negros supermasivos y fondos de radiación gravitatoria de origen cosmológico.

En paralelo al diseño de todos estos detectores basados en interferometría, existen dos métodos más completamente diferentes para detectar (directa o indirectamente) la radiación gravitacional

en otros rangos de frecuencia. El primero de ellos se basa en buscar los modos B de la polarización del fondo cósmico de microondas, que nos proporcionaría evidencias de ondas gravitacionales a  $10^{-16}$  Hz. Este es uno de los objetivos de observatorios como BICEP3, Planck o de futuros como CMBPol. A frecuencias algo más altas, entre  $10^{-9}$  y  $10^{-7}$  Hz, se pueden detectar ondas gravitacionales basándose en el ajuste temporal (*timing*) de un conjunto de púlsares con periodos de milisegundos. En la actualidad hay tres grandes colaboraciones que trabajan conjuntamente en un proyecto internacional IPTA utilizando los radiotelescopios más grandes del mundo. Estos son: Parkes Pulsar Timing Array (PPTA), European Pulsar Timing Array (EPTA) y Nanohertz Observatory for Gravitational Waves (NANOGrav). En un futuro se espera que también contribuya SKA. Las fuentes en esta banda incluyen los agujeros negros más masivos, con masas superiores a  $10^8$  masas solares y fondos de radiación gravitatoria producidos por cuerdas cósmicas o inflación. La caracterización del fondo producido por la colisión de agujeros negros supermasivos nos dará información sobre los modelos de evolución de galaxias y sobre la formación y crecimiento de agujeros negros. En cambio, el fondo de origen cosmológico nos podrá dar información sobre la física a energías correspondientes a las teorías de la gran unificación e incluso más allá. Todo ello permitirá probar la teoría de la relatividad general y restringir teorías de gravedad alternativas.

### Qué ciencia esperamos hacer

Los detectores de ondas gravitacionales estudiarán fuentes caracterizadas por condiciones físicas extremas: campos fuertes no lineales, movimientos relativistas, densidades, temperaturas y campos magnéticos muy altos. Nos servirá para dar respuesta a muchas de las siguientes preguntas:

#### Astrofísica

- ¿Cuán abundantes son los agujeros negros de masa estelar?
- ¿Cuál es el mecanismo que genera explosiones de rayos gamma?
- ¿Cuáles son las condiciones en los núcleos de las galaxias dominadas por enormes agujeros negros?
- ¿Dónde y cuándo se forman los agujeros negros masivos, y qué papel juegan en la formación de las galaxias?
- ¿Qué sucede cuando colapsa una estrella masiva?
- ¿Cómo se forman y evolucionan los sistemas de estrellas binarias, y cuál ha sido su efecto sobre las tasas de formación de estrellas?
- ¿Cuál es la composición y estructura de las estrellas de neutrones?
- ¿Qué pasó en los primeros segundos del universo?

### Física Fundamental

- ¿Cuáles son las propiedades de las ondas gravitacionales?
- ¿Se propagan las ondas gravitacionales a la velocidad de la luz? (Otra manera de preguntar esto es: ¿tiene masa el gravitón, o no tiene masa como los fotones?)
- ¿Sigue siendo válida la relatividad general bajo condiciones de gravedad fuerte?
- ¿Son los agujeros negros de la naturaleza como los agujeros negros de la relatividad general?
- ¿Cómo se distorsiona el espacio tiempo cerca del horizonte de agujeros negros?
- ¿Cómo se comporta la materia en condiciones extremas de densidad y presión?

### Cosmología

- ¿Cuál es la historia de la expansión acelerada del universo?
- ¿Hubo transiciones de fase en el universo temprano?

Otro artículo en esta revista provee detalles acerca de cómo se puede comprobar la validez de la teoría de la Relatividad General con observaciones de ondas gravitacionales.

Culminando décadas de trabajo, el campo de astronomía gravitacional comenzará esta década con detectores de sensibilidad exquisita, y cientos de físicos y astrónomos buscando y encontrando los mensajes del universo escondidos en detalles de ondas gravitacionales. Esto será sólo el principio de un camino por recorrer, con muchas lecciones y sorpresas.

### Referencias

- [1] A. EINSTEIN, "The foundation of the general theory of relativity", *Annalen Phys.* 49:769-822, 1916.
- [2] A. EINSTEIN, *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation* (Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften Berlin, Sitzungsberichte: 688-696, 1916).
- [3] A. EINSTEIN, *Über Gravitationswellen* (Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften Berlin, Sitzungsberichte: 154-167, 1918).
- [4] R. A. HULSE y J. H. TAYLOR, "Discovery of a pulsar in a binary system", *Astrophys. J.* 195:L51-L53, *Astrophys. J.* 1975.
- [5] J. WEBER, "Gravitational-Wave-Detector Events", *Phys. Rev. Lett.* 20, 1307, 1968.
- [6] <http://www.ligo.org/scientists/>



**Gabriela González**  
Louisiana State University,  
EE. UU.



**Alicia Sintes**  
Departament de Física,  
Universitat de les Illes Balears



Abrimos nuestra dirección de correo ([revista.de.fisica@rsef.es](mailto:revista.de.fisica@rsef.es)) a todas aquellas fotos, dibujos e ilustraciones que nos queráis hacer llegar a la redacción.

**¿ERES UN AMANTE DE LA FOTOGRAFÍA?**

La *Revista de Física* busca contribuciones que puedan ser utilizadas en futuros artículos.  
**¡Vuestras contribuciones hacen la revista!**