

La Astronomía de Ondas Gravitatorias en el siglo XXI

Alberto Lobo y Carlos F. Sopena

Desde sus comienzos la Astronomía ha estado dominada por el uso de instrumentos que detectan luz, desde los primeros telescopios ópticos hasta los más modernos detectores de rayos X y gamma. Fruto de este desarrollo han sido grandes descubrimientos que han ido configurando nuestra forma de comprender el Universo. Durante el siglo pasado se han empezado a desarrollar nuevas formas de Astronomía basadas en mensajeros diferentes a la luz: detectores de rayos cósmicos, de neutrinos y de ondas gravitacionales. Las ondas gravitacionales son una consecuencia de la Teoría General de la Relatividad de Einstein y corresponden a oscilaciones de la geometría del espacio-tiempo que se propagan de forma similar a las ondas electromagnéticas. La debilidad de la fuerza gravitatoria hace que la detección de estas ondas suponga un gran reto tecnológico. Sin embargo, desde el punto de vista científico son una gran oportunidad, ya que transportan información prácticamente incorrupta de las fuentes que las generaron, la cual en muchos de los casos es difícil o imposible de obtener por otros medios. Este artículo es una introducción a la Astronomía de Ondas Gravitatorias, a sus métodos, a su estado actual y sobre todo a las grandes perspectivas que ofrece con la apertura de una nueva ventana a la exploración del Universo que tendrá un gran impacto tanto en Astrofísica como en Cosmología e incluso en Física Fundamental.

Dentro del marco de la Física Teórica, la gravedad aparece como una de las cuatro *interacciones fundamentales*, siendo las otras tres la electromagnética y las interacciones nucleares débil y fuerte. Electromagnetismo y gravitación son las dos únicas interacciones de largo rango de acción (en principio ilimitado), en contraposición a las dos interacciones nucleares, cuyo rango de acción está limitado esencialmente a regiones cuyo tamaño es del orden de un núcleo atómico o inferior. Una consecuencia directa de esto es que las interacciones nucleares no pueden transportar información a distancias macroscópicas y por lo tanto no son de utilidad para la Astronomía. Las otras dos, electromagnetismo y gravedad, se propagan a través del espacio a la velocidad de luz, tal y como nos indican las teorías de Maxwell y Einstein respectivamente, y tal como comprobamos en diferentes observaciones y experimentos. Lo que determina la fuerza que estas interacciones producen son su intensidad y las correspondientes susceptibilidades de la materia a ellas, lo que denominamos *cargas*, la carga eléctrica en el caso electromagnético y la masa en el caso gravitatorio. En la naturaleza observamos que la interacción electromagnética produce fuerzas que son muchos órdenes de magnitud superiores a las de la gravitatoria, que es la más débil de todas las interacciones. Por lo tanto, no es de extrañar que la Astronomía haya estado dominada completamente por detectores de ondas electromagnéticas y fotones (las partículas cuánticas asociadas a campos electromagnéticos), desde telescopios ópticos hasta detectores de rayos X y gamma, incluyendo antenas de radio. Gracias a estos instrumentos la Astronomía ha producido grandes revoluciones que han cambiado nuestra percepción del Universo: Desde

la Copernicana que comenzó en el siglo XVI, hasta los descubrimientos en cosmología que comenzaron en el siglo XX y continúan hoy día.

Pero no todo lo que se mide u observa en astronomía es luz, hay otros mensajeros que nos informan sobre lo que sucede en diferentes lugares de nuestro Universo: meteoritos, neutrinos, rayos cósmicos (protones, electrones, etc.), ondas gravitatorias. Los meteoritos nos dan información de nuestro entorno local, principalmente del Sistema Solar. Los neutrinos y rayos cósmicos pueden provenir desde nuestro entorno local hasta galaxias muy distantes. La detección de estas partículas, mediante técnicas similares a las empleadas en aceleradores de partículas, ha dado lugar a una nueva área de investigación muy activa denominada *Astropartículas*. El mensajero del que trata este artículo son las ondas gravitatorias y su empleo para la investigación astronómica constituye lo que denominamos *Astronomía de Ondas Gravitatorias*.

Las ondas gravitatorias son una predicción de la Teoría General de la Relatividad (conocida comúnmente como Relatividad General) propuesta por Albert Einstein (1915) para incluir la gravitación en la estructura espacio-temporal propuesta por él mismo en su Teoría Especial de la Relatividad (1905). Uno de los aspectos más destacados de esta teoría es que el espacio deja de ser un simple *contenedor* de los fenómenos físicos para convertirse en un objeto dinámico, en el sentido que su geometría cambia conforme a los movimientos y distribuciones de masas y energía. No solo eso, al tiempo físico le sucede algo similar, de forma que su transcurso también depende de la distribución de masa y energía. En la Teoría de la Relatividad espacio y tiempo aparecen como una única estructura que denominamos *espacio-tiempo*, cuya geo-

metría esta determinada por la distribución de masa y energía, y a su vez, la geometría determina el movimiento de la materia y de la energía. De esta forma, la gravedad aparece como una manifestación de la geometría del espacio-tiempo, una elegante implementación del principio Galileano de que todos los objetos, independientemente de su masa y composición, *caen* con la misma aceleración. Una consecuencia del carácter dinámico del espacio-tiempo en la Relatividad General es que las oscilaciones de su geometría se propagan como ondas con una velocidad, medida localmente, exactamente igual a la velocidad de la luz. Las ondas gravitatorias, al cambiar la geometría local de las regiones que atraviesan (véase figura 1), cambian la distancia física entre objetos, siendo dicho cambio proporcional a la distancia misma y a la amplitud de la ondas. Como en el caso electromagnético este es un efecto transverso, es decir, los cambios en la distancia se producen en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda gravitatoria. Además, tanto ondas electromagnéticas como gravitatorias tienen dos estados de polarización independientes, aunque en teorías de la gravedad alternativas a la Relatividad General puede haber hasta seis polarizaciones independientes. Una diferencia importante entre ondas electromagnéticas y gravitatorias tiene que ver con su generación. En el contexto astronómico, las ondas electromagnéticas se generan por cargas aceleradas (emisión predominantemente dipolar), como por ejemplo electrones, cuyo tamaño es muy inferior al de los objetos de los que forman parte y como consecuencia, pueden emitir luz en una longitud de onda suficientemente pequeña como para realizar imágenes de objetos astronómicos. En contraste, las ondas gravitatorias se generan por cambios temporales de la distribución de masa-energía de un objeto (radiación predominantemente cuadrupolar), y por este motivo sus longitudes de onda suelen ser del orden del tamaño del objeto que las genera o mayores, con lo cual no es posible en general realizar imágenes. En este sentido se podría decir que la Astronomía de Ondas Gravitatorias está más cercana a la Acústica que a la Óptica.

La relativa debilidad de la gravedad es la causa de que las ondas gravitatorias tengan una amplitud relativamente

pequeña y que su detección sea una empresa extremadamente complicada. Ondas gravitatorias producidas por fuentes galácticas, como la colisión de dos estrellas de neutrones, inducen desplazamientos del orden del tamaño de un núcleo atómico o inferiores en un detector terrestre de un kilómetro de tamaño. La gran ventaja que proporcionan las ondas gravitatorias es que por su débil interacción con la materia transportan información prácticamente incorrupta de las fuentes astronómicas que las generaron.

La construcción de un detector de ondas gravitatorias supone un gran reto tecnológico, y tal empresa no comenzó hasta los años sesenta, con el trabajo pionero de Joseph Weber en detectores resonantes. El principio de funcionamiento de estos detectores se basa en que una onda gravitatoria que atraviese un sólido cambiará su tamaño de forma oscilatoria, excitando de esta forma sus modos propios de oscilación. La idea por lo tanto es crear un dispositivo que sea sensible a las oscilaciones del sólido y nos permita extraer la señal gravitatoria que las ha producido. Varios detectores de este tipo, la mayoría con forma cilíndrica, se han construido en varias partes del mundo y, contrariamente a las aseveraciones de detección de Weber en los años 70, no han conseguido hasta la fecha detectar ondas gravitatorias. De hecho, ningún tipo de detector las ha detectado. Entonces, ¿estamos seguros que las ondas gravitatorias existen? ¿Tenemos alguna evidencia de su existencia?

La respuesta a estas preguntas es que sí, y el principal argumento nos lo proporcionó el descubrimiento en 1974 del primer púlsar binario, PSR B1913+16, por Russell Hulse y Joseph Taylor, lo que les valió el premio Nobel de Física en el año 1993. Los púlsares son estrellas de neutrones dotadas de un enorme campo magnético que acelera partículas cargadas produciendo la emisión de un haz de radiación electromagnética en la dirección del eje magnético. Como el eje magnético no suele estar alineado con el eje de rotación, esta emisión electromagnética describe un cono, convirtiendo los púlsares en faros cósmicos (véase figura 2). Si nuestro planeta se encuentra en la dirección del cono de emisión del púlsar observaremos una serie de pulsos de

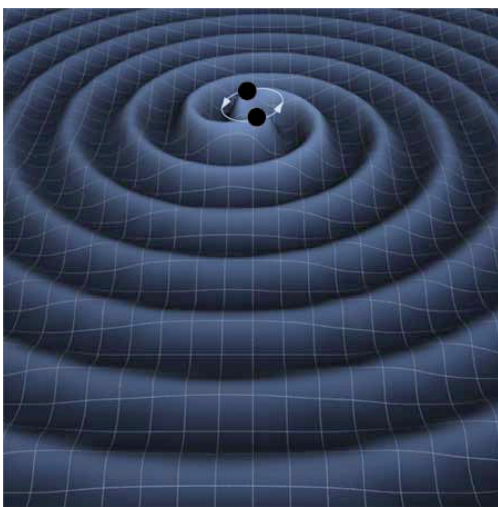


Fig.1. Impresión artística de las ondas gravitatorias producidas por un sistema binario de dos agujeros negros. [Foto: K. Thorne (Caltech) y T. Carnahan (NASA GSFC)].

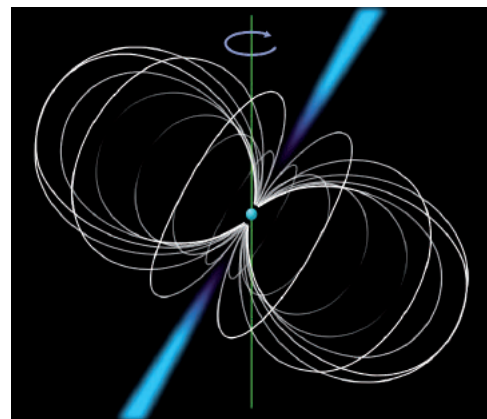


Fig.2. Esquema del funcionamiento de un púlsar. El eje de rotación y el magnético son diferentes. El campo magnético acelera partículas cargadas produciendo una emisión de radio a lo largo del eje magnético. Con la rotación de la estrella este haz gira describiendo un cono en el espacio, de forma que un púlsar actúa como un faro cósmico [Imagen extraída de Wikipedia].

radio, que en caso de los púlsares con rotación más rápida se dan con un ritmo tan uniforme que los convierte en relojes de precisión comparable a los relojes atómicos (¡el púlsar más rápido conocido completa más de 700 revoluciones por segundo! El de Hulse y Taylor 17). Esto permite observaciones astronómicas de una precisión sin precedentes. El púlsar de Hulse y Taylor orbita alrededor de otra estrella de neutrones de forma que el tamaño de la órbita es suficientemente pequeño (la distancia mínima entre ellas es aproximadamente la mitad de la distancia de la Tierra al Sol) como para que estas estrellas tan compactas (tienen una masa un poco inferior a una vez y media la masa del Sol pero un radio de tan sólo unos 10 kilómetros) se muevan de forma que los efectos relativistas importen para una descripción precisa del sistema. En concreto, el movimiento orbital periódico de tales masas con velocidades considerables (cientos de kilómetros por segundo respecto del centro de masas del sistema binario) produce cambios periódicos significativos en la geometría del espacio-tiempo de su entorno. Y estos cambios periódicos en la geometría no son más que ondas gravitatorias que se propagan en todas las direcciones llevándose consigo energía y momento angular del sistema. Esta emisión gravitatoria afecta a su vez al movimiento orbital, disminuyendo su tamaño y el periodo orbital, tal y como se observa. También se pueden observar otros efectos relativistas como la precesión del periastro de la órbita. Los 35 años de observaciones del púlsar binario de Hulse y Taylor han permitido comprobar que la evolución de su órbita coincide con la predicha por el mecanismo de emisión de radiación gravitatoria de la Relatividad General con una precisión relativa del 0.2%. Actualmente se conocen otros púlsares binarios y algunos de ellos también se encuentran en un régimen relativista. El denominado *púlsar doble*, PSR J0737-3039A/B, un sistema binario compuesto por dos púlsares, se ha convertido recientemente en el mejor test disponible de la Relatividad General, alcanzado precisiones relativas del 0.05%.

Estos descubrimientos han contribuido a impulsar el desarrollo de detectores de ondas gravitatorias, y los que hoy en día han alcanzando una mayor sensibilidad son los llamados detectores interferométricos. Son básicamente interferómetros del tipo Michelson-Morley dispuestos en una forma de L (véase figura 3) y el concepto de funcionamiento es relativamente simple (véase figura 4): cuando una onda gravitatoria incide perpendicularmente al plano del detector produce cambios en la longitud de los brazos del interferómetro, de forma que mientras uno se acorta el otro se alarga



Fig.3. Imagen aérea del detector interferométrico de LIGO en Hanford (4 kilómetros de brazo), Washington (izquierda) y del detector VIRGO en Pisa (3 kilómetros de brazo), Italia (derecha).

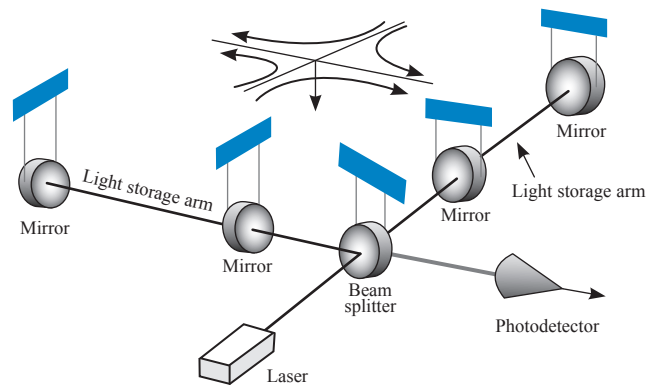


Fig.4. Esquema básico de un detector de ondas gravitatorias interferométrico. Un haz de luz láser se divide en dos de forma que atraviesa los dos brazos del interferómetro pasando y reflejándose en los espejos en suspensión que actúan como masas de prueba. Al recombinarse en el fotodetector podemos detectar la presencia de ondas gravitatorias mediante el análisis de las franjas de interferencia [Imagen cortesía del laboratorio LIGO].

y viceversa. Estos cambios dan lugar a interferencias de las cuales se puede inferir el patrón de las ondas gravitatorias que han atravesado el detector. Actualmente hay varios detectores interferométricos terrestres en operación: LIGO en los Estados Unidos (dos 4 km y uno de 2 km de brazo); VIRGO en Italia con participación de varios países europeos (3 km de brazo); GEO600 en Alemania con participación británica (600 m de brazo). Aparte hay varios proyectos en desarrollo en diversas partes del planeta, como por ejemplo el LCGT en Japón (3 km de brazo), un ambicioso proyecto recientemente aprobado que sustituye al anterior detector TAMA y al prototipo CLIO, y que se convertirá en el primer detector interferométrico de tipo criogénico. La banda de frecuencias a la que operan está contenida en el rango 10-10000 Hz. A frecuencias más bajas están limitados por ruido sísmico y el gradiente gravitatorio, mientras que a frecuencias más altas están limitados por el ruido de los fotodetectores. Pese a que no se han realizado aún detecciones, observaciones de LIGO han servido para producir nueva ciencia mediante el análisis de las consecuencias de las no detecciones al nivel de sensibilidad actual. Se pueden destacar dos resultados: (1) En la constelación del Cangrejo hay un púlsar joven resultado de una supernova (explosión de una estrella). La frecuencia rotacional de este púlsar disminuye con el tiempo. LIGO ha limitado a un 4% la contribución de una hipotética emisión de radiación gravitatoria, lo cual excluye diversos modelos astrofísicos que trataban de explicar este fenómeno. (2) La teoría cosmológica de la gran explosión (Big Bang) requiere una fase primitiva de gran expansión del Universo que daría lugar, entre otras cosas, a un fondo de radiación gravitatoria. Las observaciones de LIGO han puesto límites a la densidad de energía almacenada en este fondo, mejorando los límites impuestos por la teoría de formación de elementos primordiales, parte a su vez del modelo estándar de la Cosmología. Durante el presente año, tanto LIGO como VIRGO pararán las operaciones para incorporar tecnología avanzada: mejora de los sistemas de vacío, láseres de precisión más potentes y mejoras de los sistemas ópticos y mecánicos. Con esto se logrará una mejora de un orden de magnitud en la sensibili-

dad, lo cual equivale a aumentar en tres órdenes de magnitud el volumen del cosmos que cubrirán. Al mismo tiempo se realizará la construcción del detector criogénico LCGT en la mina de Kamioka (Japón). Una vez estos modelos avanzados entren en operación se espera que realicen detecciones de radiación gravitatoria con un ritmo, de acuerdo con los pronósticos astrofísicos sobre la formación de las fuentes de ondas gravitatorias relevantes, de 10-1000 eventos por año.

Las principales fuentes astrofísicas y cosmológicas para estos detectores terrestres son: colisiones de sistemas binarios formados por agujeros negros estelares y/o estrellas de neutrones; oscilaciones de estrellas relativistas; supernovas; fondos cosmológicos de diverso origen. Estas observaciones revelarán información clave para entender la formación de objetos compactos estelares, la ecuación de estado de estrellas de neutrones, la validez de la Relatividad General, etc.

Por otra parte, la Agencia Europea del Espacio (ESA) y la Administración Nacional para el Espacio y la Aeronáutica norteamericana (NASA) colaboran en la construcción de un observatorio espacial de ondas gravitatorias, la Antena Espacial de Interferometría Láser (LISA), que se espera que se lance durante la década de 2020. Hay dos motivos de peso para construir un observatorio espacial. El primero es cubrir la banda de bajas frecuencias, en el rango 3×10^{-5} - 0.1 Hz, inaccesible a los detectores terrestres. El segundo es que esta banda de frecuencias da acceso a fuentes de ondas gravitatorias y a una ciencia completamente diferentes, con muchas más implicaciones para el panorama de la Astrofísica y la Cosmología. LISA se compone de tres naves espaciales dispuestas en un triángulo equilátero, de 5 millones de kilómetros de lado, y que siguen una órbita alrededor del Sol (véase figura 5). Para que la dinámica propia de cada nave preserve lo más posible la configuración triangular, esta ha de estar inclinada 60° respecto del plano de la eclíptica (véase figura 6). De esta forma el triángulo gira sobre su baricentro una vez por año/órbita, lo cual introduce una modulación en las señales gravitatorias que es muy útil para localizar los objetos que las emitieron. LISA es una misión con una tecnología muy novedosa y exigente que una misión precursora de la ESA, LISA Pathfinder, se encargará de demostrar. Nuestro grupo en el Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC) participa en el desarrollo de esta misión contribuyendo con algunos instrumentos fundamentales, como por ejemplo el ordenador que controlará el denominado *LISA*

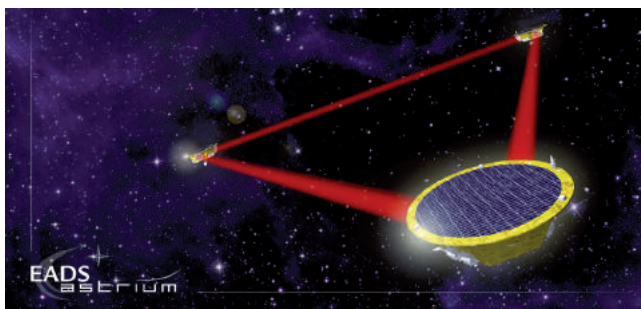


Fig.5. Impresión artística de la constelación LISA, compuesta por tres naves espaciales en configuración triangular y separadas cinco millones de kilómetros. Las naves se envían luz láser entre ellas [Imagen cortesía de EADS Astrium].

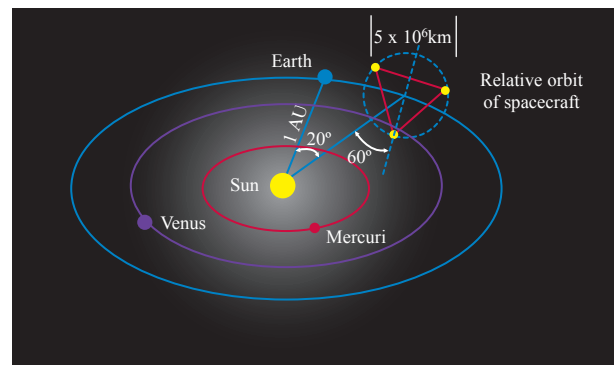


Fig.6. Órbita heliocéntrica de la constelación LISA. La constelación triangular orbita alrededor del Sol y realiza una rotación completa alrededor de su baricentro por cada órbita (año). Esta separada 20° (medido sobre el plano orbital) de la Tierra para minimizar los efectos de esta [Imagen cortesía de la Agencia Espacial Europea (ESA)].

Technology Package, el conjunto de experimentos que LISA Pathfinder realizará.

Pasando a la parte científica de LISA, uno de los principales puntos a resaltar es el hecho de que actualmente LISA es el único proyecto de detector de radiación gravitatoria del que conocemos fuentes garantizadas. Se trata de sistemas binarios galácticos con periodos inferiores a 2 horas, conocidos como *binarias de verificación* ya que serán muy útiles para la calibración de LISA. Además, se espera que LISA observe principalmente las siguientes fuentes de ondas gravitatorias: (i) *Sistemas estelares binarios en nuestra galaxia y algunos extragalácticos*. LISA detectará varios millones de estos sistemas, la mayor parte de los cuales formarán un fondo de radiación gravitatoria y los más *brillantes* podrán resolverse y separarse de este fondo. (ii) *Caída orbital y colisión de agujeros negros supermasivos*. Las observaciones astronómicas nos proporcionan evidencia de que prácticamente todas las galaxias contienen un agujero negro en su núcleo central y que estas, a lo largo de su historia, han sufrido varias colisiones con otras galaxias (véase figura 7). Cuando dos galaxias colisionan para formar una nueva, sus respectivos agujeros negros migran hacia el nuevo núcleo debido a la fricción dinámica, donde forman un sistema binario cuya órbita, a partir de un determinado momento, se reducirá por emisión de radiación gravitatoria hasta la colisión final, que resultará en la formación de un único agujero negro. LISA será capaz de detectar todas estas colisiones dentro de nuestro Universo observable. (iii) *La captura y posterior caída orbital de objetos estelares compactos (enanas blancas, estrellas de neutrones, agujeros negros estelares) hacia agujeros negros supermasivos*. En el núcleo galáctico, en torno a los agujeros negros supermasivos, hay una gran concentración de objetos estelares compactos. Eventualmente, y debido a interacciones gravitatorias entre ellos, uno de estos objetos estelares puede ser capturado por la gravedad del agujero negro supermasivo e iniciar una larga caída en espiral hacia este (debido a la emisión de radiación gravitatoria del sistema) hasta ser finalmente absorbido por él. Esta caída es lenta, de tal forma que LISA podrá detectar la radiación gravitatoria emitida durante

cientos de miles de órbitas durante el último año de uno de estos sistemas, y esto supone que podremos extraer sus parámetros físicos con una gran precisión. (iv) *Fondos de radiación gravitatoria de origen cosmológico*. De acuerdo con la mayoría de mecanismos teóricos que los predicen, el espectro de estos fondos es muy amplio (en algunos casos es plano o ligeramente inclinado) y pueden ser observados por detectores que operen en diferentes partes del espectro gravitatorio.

La detección de las fuentes descritas permitirá desarrollar una ciencia muy amplia y revolucionaria, que influenciará tanto la Astrofísica y la Cosmología como la Física Fundamental. Sobre la ciencia que se espera desarrollar con LISA podemos destacar: comprensión de la dinámica de los núcleos galácticos; comprobar la validez de diferentes modelos de formación de galaxias; comprobar si los agujeros negros son como los describe la Relatividad General (caracterizados únicamente por su masa y momento angular intrínseco); poner a prueba teorías alternativas a la Relatividad General; etc.

A parte de los detectores de ondas gravitatorias descritos, se ha propuesto otra forma de detectar ondas gravitatorias basada en el ajuste temporal (*timing*) de un conjunto de púlsares con periodos del orden de milisegundos. Cuando una onda gravitatoria pasa a través de la región entre los púlsares y la Tierra produce cambios en los tiempos de llegada de los pulsos. Con una tecnología adecuada, un buen número de púlsares (un par de decenas) y un tiempo de observación suficientemente largo (unos diez años), la presencia de ondas gravitatorias, en la banda ultra baja, entre 10^{-9} y 10^{-7} Hz, puede ser detectada. Las fuentes en esta banda incluyen los

agujeros negros más masivos, con masas superiores a cientos de millones de veces la masa del Sol, y fondos de radiación gravitatoria de origen diverso.

La Astronomía de Ondas Gravitatorias se inició durante la segunda mitad del siglo pasado y ha de tener su época de esplendor a lo largo de la primera mitad del presente, con la puesta en funcionamiento de la segunda generación de detectores terrestres como LIGO, VIRGO y LCGT, con el futuro observatorio espacial LISA, con la observación de múltiples púlsares y con el desarrollo de proyectos de tercera generación que están siendo actualmente debatidos y diseñados. Cada vez que en Astronomía se ha abierto una nueva ventana a la exploración del Universo (infrarrojo, radio, rayos X, rayos gamma, etc.) se han realizado grandes descubrimientos. Muchos de ellos han consistido en la aparición de nuevos objetos astronómicos y/o nuevos fenómenos físicos, la mayoría de veces de forma inesperada. La Astronomía de Ondas Gravitatorias abrirá una nueva ventana usando una nueva herramienta, un nuevo mensajero cósmico, la gravedad, y con ello nos esperan nuevas sorpresas y grandes descubrimientos que pueden cambiar nuestra forma de ver el Universo.

Referencias

- [1] EINSTEIN, A., LORENTZ, H.A., WEYL, H., MINKOWSKI, H. *The Principle of Relativity*, Dover Books on Physics (1952).
- [2] EINSTEIN, A. *Die Feldgleichungen der Gravitation*, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, pp. 844-847 (1915).
- [3] EINSTEIN, A. Über Gravitationswellen, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, pp. 154-167 (1918).
- [4] EINSTEIN, A. *Sobre la teoría de la Relatividad Especial y General*, Alianza Editorial (2008).
- [5] HOBBS, G. et al. *The International Pulsar Timing Array project: using pulsars as a gravitational wave detector*, Classical and Quantum Gravity **27**, 084013 (2010).
- [6] HULSE, R.A., TAYLOR, J.H. *Discovery of a pulsar in a binary system*, The Astrophysical Journal Letters, **195**, L51-L53 (1975).
- [7] KENNEFICK, D. *Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves*. Princeton University Press (2007).
- [8] KRAMER, M. et al. *Tests of General Relativity from Timing the Double Pulsar*, Science **314**, 97-102 (2006).
- [9] Observatorio GEO600. URL: <http://www.geo600.org>.
- [10] Observatorio LCGT. URL: <http://gw.icrr.u-tokyo.ac.jp/lcgt>.
- [11] Observatorio LIGO. URL: <http://www.ligo.caltech.edu>.
- [12] Observatorio LISA. URL: <http://sci.esa.int/lisa>.
- [13] Observatorio VIRGO. URL: <http://www.virgo.infn.it>.
- [14] SATHYAPRAKASH, B.S., SCHUTZ, B.F. *Physics, Astrophysics and Cosmology with Gravitational Waves*, Living Reviews in Relativity **12** (2009).
- [15] THORNE, K.S. *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, W.W. Norton & Co. (1995).
- [16] WILL, C.M. *¿Tenía razón Einstein?*, Editorial Gedisa (1989).



Fig.7. Colisión entre dos galaxias espirales (NGC 6050 y IC 1179) en la constelación de Hércules, a unos 450 millones de años luz de la Tierra. Estas galaxias forman parte del cúmulo de galaxias Hércules, parte a su vez de la Gran Muralla de cúmulos y supercúmulos, la estructura más grande conocida en el Universo. Imagen tomada por el Telescopio Espacial Hubble. [Créditos de las imágenes: NASA, ESA, el Hubble Heritage (STScI / AURA) – colaboración ESA/Hubble y K. Noll (STScI)].

Alberto Lobo y Carlos F. Sopena
Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC), Barcelona.