

ARTÍCULO

## LAS ONDAS GRAVITACIONALES

Miguel Alcubierre



## Las ondas gravitacionales

### Resumen

La relatividad general de Einstein es la teoría moderna de la gravedad. Esta teoría identifica la gravedad con una distorsión en la geometría del espacio y del tiempo. Entre sus muchas predicciones se encuentran las ondas gravitacionales, distorsiones de la gravedad que se producen en eventos astrofísicos violentos y que viajan por el espacio a la velocidad de la luz. A casi 100 años de su predicción, las ondas gravitacionales aún no han sido detectadas. Recientemente se han construido gigantescos observatorios que esperan detectar estas ondas por primera vez en los próximos años, abriendo así una nueva era para la astronomía.

**Palabras clave:** Relatividad, gravitación, ondas, agujeros negros

### Title: Gravitational waves

### Abstract

Einstein's General relativity is the modern theory of gravity. This theory identifies gravity with a distortion in the geometry of space and time. One of its many predictions are the so-called gravitational waves, distortions in gravity that are produced in violent astrophysical events and that propagate through space at the speed of light. Almost one hundred years after their prediction, gravitational waves still haven't been detected. Recently, several gigantic observatories have been built that hope to detect gravitational waves for the first time in the next few years, thus opening a new age for astronomy.

**Keywords:** Relativity, gravity, waves, black holes

### Gravedad y acción a distancia

Es posible argumentar que la ciencia moderna se inició a principios del siglo XVII, cuando Galileo Galilei comenzó a estudiar el movimiento de los cuerpos y, en particular, la caída de estos en la gravedad terrestre. Galileo hizo grandes contribuciones a la física y la astronomía, comenzando por la construcción de un telescopio propio sin nunca haber visto uno antes (al parecer sólo había oído hablar de su existencia), y por su idea enormemente original de apuntarlo hacia los cielos. Gracias a este instrumento Galileo descubrió los cráteres y montañas de la Luna, las lunas de Júpiter, las fases de Venus y las manchas solares, todo lo cual terminó por convencerlo de que el sistema heliocéntrico de Copérnico era correcto, lo que le ocasionó no pocos problemas con las autoridades eclesiásticas. Pero más allá de la astronomía, Galileo también realizó importantes contribuciones al estudio de la física, y en particular al estudio del movimiento. En el caso de la

caída de los cuerpos, Galileo fue el primero en realizar experimentos que mostraban que si se eliminaba la fricción lo más posible, objetos de diferente masa caían con la misma aceleración en la gravedad terrestre, lo que contradecía dos milenios de física aristotélica. En esa época esto no era más que una observación interesante, pero con el paso de los siglos ha resultado ser una observación revolucionaria.

Para la segunda mitad del siglo XVII Isaac Newton sentó las bases matemáticas de la física y formuló las leyes del movimiento que aún llevan su nombre. Entre sus más grandes contribuciones, Newton concluyó que la fuerza de gravedad que hace que los objetos caigan a la Tierra, es exactamente la misma que mantiene a la Luna dándole vueltas a la Tierra, y a la Tierra y los demás planetas dándole vueltas al Sol. Newton postuló la ley de la “gravitación universal”, que permitía explicar matemáticamente las órbitas de los planetas, y que daba como resultado automático las leyes sobre el movimiento planetario, descubiertas por Johannes Kepler medio siglo antes, a partir de observaciones muy precisas de la posición de los planetas en el cielo. Por ejemplo, Kepler había mejorado el modelo heliocéntrico de Copérnico, al mostrar que los planetas se movían alrededor del Sol en elipses en lugar de círculos, y la ley de la gravitación de Newton predecía estas elipses de forma natural.

Desde el punto de vista newtoniano, la gravedad podía describirse como una fuerza que actuaba de manera instantánea entre dos objetos con masa. La naturaleza de esta fuerza y la manera en la que se propagaba de un objeto a otro, eran desconocidas. Esta “acción a distancia” a través del espacio vacío, fue causa de muchas críticas hacia la teoría de Newton. Newton mismo entendía muy bien dichas críticas, pero su teoría funcionaba muy bien en la práctica, y en ese momento aún no se contaba con los elementos adecuados como para tener una descripción más satisfactoria. Habría que esperar otros 250 años.

## **Electromagnetismo y la velocidad de la luz**

La acción a distancia permaneció como un mal necesario en la física hasta el siglo XIX, cuando científicos como Coulomb, Ampere y Faraday estudiaron las propiedades de la electricidad y el magnetismo. Hacia mediados del siglo XIX, James Clerk Maxwell unificó las leyes de la electricidad y el magnetismo en un conjunto de ecuaciones matemáticas hoy conocidas como las “ecuaciones de Maxwell”, en las que la electricidad y el magnetismo resultaban ser manifestaciones distintas de un mismo fenómeno.

Las leyes del electromagnetismo de Maxwell estaban basadas en un concepto nuevo en esa época, inicialmente introducido por Faraday, y que hablaba de la existencia de “campos de fuerza” que

permeaban el espacio. Los campos eléctrico y magnético eran producidos por cargas y corrientes eléctricas, pero se extendían más allá de dichas cargas, y podían visualizarse como “líneas de fuerza” que conectaban unas cargas con otras. Más aún, las variaciones en el campo eléctrico podían producir un campo magnético y viceversa, incluso lejos de las cargas responsables de la existencia del campo. En particular, las ecuaciones de Maxwell predecían que cambios en el campo electromagnético se propagaban a través del espacio como ondas. Las llamadas “ondas electromagnéticas” viajaban a una velocidad universal que podía calcularse como una combinación sencilla de constantes físicas bien conocidas. Al calcular el valor de esta velocidad Maxwell encontró que era de aproximadamente trescientos mil kilómetros por segundo. De hecho, desde fines del siglo XVII, ya se conocía algo que viajaba precisamente a esa velocidad: la luz.<sup>1</sup> Maxwell concluyó entonces que la luz debería ser precisamente una onda electromagnética, conclusión que fue posteriormente confirmada. Las ondas electromagnéticas se pueden clasificar por la frecuencia de la oscilación de los campos eléctrico y magnético asociados a ellas, y van desde las ondas de radio para frecuencias bajas, pasando por las microondas, la luz infrarroja, la luz visible, la luz ultravioleta, los rayos X y, finalmente, los rayos gamma a frecuencias muy altas.

Las ondas electromagnéticas mostraban por primera vez que era posible tener una entidad física no material, el campo de fuerza, que podía propagarse por el espacio vacío a una gran velocidad. Esto permitía desde luego pensar que la fuerza de gravedad newtoniana podía ser en realidad un campo de fuerza similar al electromagnético, pero producido por las masas de los objetos en vez de por sus cargas eléctricas.

## La relatividad general y las ondas gravitacionales

El ingrediente final para lograr tener una teoría de campo de la gravitación, tuvo que esperar hasta los trabajos de Albert Einstein a principios del siglo XX. En 1905 Einstein publicó una serie de trabajos que revolucionaron la física. Para nuestros propósitos el trabajo más importante fue la teoría de la relatividad, aunque en ese mismo año Einstein también contribuyó de manera fundamental al desarrollo de la teoría cuántica y la mecánica estadística.

La teoría de la relatividad se separa naturalmente en dos partes: la “relatividad especial” de 1905, y la “relatividad general” de 1915, ambas desarrolladas por Einstein. La relatividad especial surgió a partir de la necesidad de reconciliar las dos grandes teorías de la física clásica, la mecánica de Newton y la electrodinámica de Maxwell. En el corazón de la teoría de Newton se encontraba el llamado “principio de relatividad” postulado por Galileo, y que decía que las leyes físicas no podían depender de la velocidad de movimiento de un observador. En otras palabras, la velocidad es

<sup>1</sup> La velocidad de la luz fue mediada por Ole Christensen Romer en 1676, a partir de observaciones astronómicas del movimiento de las lunas de Júpiter.

sólo relativa, y observadores que se mueven unos respecto a otros a velocidades constantes, deben observar las mismas leyes de la física. La teoría del electromagnetismo de Maxwell, sin embargo, sí parecía distinguir de manera preferencial el movimiento de ciertos observadores, lo que entraba en conflicto con el principio de relatividad. En particular, las ondas electromagnéticas viajaban a la velocidad de la luz en un sistema de referencia particular, y era de suponerse que observadores que se movieran respecto a este sistema verían a la luz moverse a una velocidad ligeramente distinta. Para resolver esta aparente contradicción se postuló la existencia de un medio llamado el “éter luminífero”, que era en el que se propagaban las ondas electromagnéticas, en analogía al aire, que es el medio donde se propaga el sonido. Dado que la Tierra gira sobre su eje, y también se mueve alrededor del Sol, era claro que no podía estar en reposo respecto al éter, por lo que debería ser posible medir pequeños cambios en la velocidad de la luz debidos al movimiento terrestre. Dicho de otra forma, debería ser posible usar la luz para medir la velocidad de la Tierra respecto al éter. A fines del siglo XIX Albert Michaelson y Edward Morley realizaron un experimento para medir dichos cambios, y para su sorpresa no encontraron nada: la velocidad de la luz medida en el laboratorio siempre resultaba igual, y no era afectada en absoluto por el movimiento de la Tierra. La Tierra, aparentemente, nunca se movía respecto al éter.

En 1905 Einstein mostró que era posible reconciliar el principio de relatividad, la teoría electromagnética, y el hecho de que la velocidad de la luz era siempre la misma, y al mismo tiempo eliminar la necesidad del éter luminífero, si se alteraban los conceptos newtonianos del espacio y del tiempo. En la teoría de la relatividad de Einstein, por ejemplo, las distancias y el flujo del tiempo no son absolutos sino que dependen del movimiento del observador: relojes en movimiento se atrasan, y reglas en movimiento se acortan. Además, eventos que ocurren a un mismo tiempo de acuerdo a un observador, ocurren a tiempos distintos para otro observador que se mueve respecto al primero: la simultaneidad es relativa.

Entre las muchas consecuencias de la teoría de Einstein se encontraba el hecho de que no sólo la velocidad de la luz resulta ser absoluta, sino que además representa un límite máximo en la velocidad de propagación de cualquier fenómeno físico. Nada, ningún objeto, ninguna señal, ni ninguna interacción física de ningún tipo, puede moverse más rápido que la luz. El electromagnetismo de Maxwell cumplía con esta restricción sin ningún problema, pero no así la gravitación universal de Newton con su acción instantánea a distancia. Era claro que había llegado el momento de modificar la teoría de la gravedad, y Einstein dedicó los siguientes 10 años a esta tarea. En su camino hacia esa nueva teoría de la gravedad Einstein se basó de nuevo en una observación de Galileo, precisamente aquella de que los cuerpos de distintas masas caen con la misma aceleración en un campo gravitacional. Einstein elevó esta observación de Galileo a un principio físico fundamental, el llamado “principio de equivalencia”, que decía que en caída

libre las leyes de la física eran equivalentes a aquellas que se obtenían en ausencia de gravedad. El principio de equivalencia sería el pilar sobre el que Einstein construiría su nueva teoría de la gravedad.

El resultado final de sus esfuerzos fue la teoría general de la relatividad de 1915, una revolucionaria teoría de la gravitación totalmente compatible con los conceptos relativistas de espacio y tiempo. En esta nueva teoría Einstein fue un paso más allá, y consideró a la gravedad como una manifestación de la distorsión, o “curvatura”, de la geometría del espacio y el tiempo. Entre las muchas consecuencias de esta teoría se encontraba el hecho de que la gravedad no se propaga de manera instantánea, sino que lo hace precisamente a la velocidad de la luz. Y, de la misma forma que el electromagnetismo predice la existencia de ondas electromagnéticas, la relatividad general predice la existencia de ondas gravitacionales: perturbaciones en la geometría del espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz

La relatividad general predice muchas otras cosas sorprendentes, además de las ondas gravitacionales. Por ejemplo, predice que el tiempo fluye más despacio mientras más intensa sea la gravedad. Esta predicción ha sido confirmada experimentalmente en muchas ocasiones. En la Tierra el efecto es muy pequeño, de aproximadamente una parte en mil millones. Es decir, por cada mil millones de años que transcurren en la superficie de la Tierra, en el espacio, lejos del campo gravitacional terrestre, transcurren mil millones de años mas uno. Podría parecer que esto es tan absurdamente pequeño, que es imposible de medir, pero no es así. El sistema de posicionamiento global (GPS) que tanto usamos hoy en día, depende de manera crucial en mantener sincronizados relojes montados en satélites artificiales con un alto grado de precisión. Errores de sincronización de una parte en mil millones, por insignificantes que parezcan, rápidamente se acumulan, de manera que después de unos pocos días el sistema produciría errores de cientos de metros en el suelo, haciéndolo totalmente inútil. La relatividad general también predice la existencia de objetos exóticos como los agujeros negros, que si bien se consideraron especulativos durante décadas, hoy en día sabemos que se encuentran en el corazón de múltiples fenómenos astrofísicos. La relatividad predice, además, la expansión del Universo, misma que a la fecha está demostrada observacionalmente, más allá de toda duda.<sup>2</sup>

Pero pese a todos los grandes logros de la teoría de la relatividad, a la fecha aún no ha podido verificarse de manera directa la existencia de las ondas gravitacionales. Se mantiene como la principal predicción aún no confirmada de la relatividad general. Existe, sin embargo, evidencia

2 Estrictamente, cuando Einstein encontró que su teoría predecía la expansión del Universo, modificó sus ecuaciones para eliminar dicha predicción, ya que en ese momento todo mundo asumía que el Universo era estático. No fue sino hasta el descubrimiento observacional de la expansión del Universo, por parte de Edwin Hubble en 1926, que Einstein aceptó que su teoría había estado bien desde el principio, y declaró que modificar sus ecuaciones había sido el error más grande de su vida.

indirecta de la existencia de estas ondas. La teoría predice que sistemas astrofísicos con campos gravitacionales intensos y dinámicos, deben emitir ondas gravitacionales.

Además, al igual que las ondas electromagnéticas, las ondas gravitacionales llevan energía. Esto significa que cuando se tiene un sistema de objetos compactos muy masivos en órbita, uno alrededor de otro, el sistema debe emitir ondas gravitacionales y, como consecuencia, perder energía, lo que alterará la forma de la órbita: los objetos se irán acercando poco a poco. En 1974, Joseph Taylor y Russel Hulse descubrieron el primer “pulsar binario”, un sistema de dos estrellas de neutrones en órbita, una alrededor de la otra.<sup>3</sup> Durante los siguientes 20 años estudiaron detenidamente la órbita de dichas estrellas y notaron cambios en la velocidad orbital, que correspondían precisamente con los que predecía la relatividad como consecuencia de la energía perdida por la emisión de ondas gravitacionales. Hulse y Taylor recibieron el premio Nobel en 1993 por este trabajo, que a la fecha sigue siendo la única evidencia, si bien indirecta, de la existencia de las ondas gravitacionales.

## Detectores de ondas gravitacionales

Es interesante contrastar el caso de la predicción de las ondas electromagnéticas por parte de Maxwell, con la predicción de las ondas gravitacionales por parte de Einstein. Menos de 20 años después de haber sido predichas, las ondas electromagnéticas fueron producidas y detectadas directamente en el laboratorio (en forma de ondas de radio) por Heinrich Hertz en 1887. Para 1895, Guglielmo Marconi ya había dado inicio a la primera aplicación tecnológica de estas ondas con su telégrafo inalámbrico. En el caso de las ondas gravitacionales, a más de 90 años de distancia de su primera predicción, aún seguimos sin detectarlas.

La razón por la que la situación ha sido tan distinta para las ondas gravitacionales, tiene que ver con la intensidad de la gravedad. Pese a que la gravedad es la fuerza más obvia en nuestra vida cotidiana, y por lo mismo fue la primera en estudiarse científicamente, resulta ser muchísimo más débil que las fuerzas eléctricas y magnéticas. Notamos más la gravedad simplemente porque no hay masas “negativas”, por lo que se acumula y se acumula, hasta hacerse muy notoria cuando las masas involucradas son muy grandes, como en el caso de las masas de los planetas y estrellas. La fuerza electromagnética, por otro lado, no se acumula de la misma forma, debido a que los átomos son neutros, compuestos como están por un mismo número de protones de carga positiva y electrones de carga negativa.

---

3 Una estrella de neutrones es la etapa final de la vida de estrellas muy masivas y es un objeto con una masa de una y media veces la masa del Sol, pero comprimido a un tamaño de pocas decenas de kilómetros. Un pulsar es una estrella de neutrones que rota rápidamente y lanza chorros de radiación por sus polos magnéticos, de manera que parecen faros estelares.

La fuerza de gravedad es tan débil, que cálculos teóricos muestran que la explosión de una supernova en nuestra galaxia produciría ondas gravitacionales tales, que al pasar por la Tierra causarían oscilaciones en los aparatos de medición de aproximadamente una parte en cien millones de billones (un uno seguido de 20 ceros). Es decir, un aparato de medición con una longitud equivalente al diámetro de la Tierra, experimentaría una deformación equivalente al tamaño de un solo protón. Medir algo tan pequeño suena tan manifiestamente absurdo, que nadie lo intentó siquiera por más de 50 años.

Sin embargo, a mediados de los sesenta Joseph Weber, de la Universidad de Maryland en los Estados Unidos, concluyó que había llegado el momento de intentar detectar las ondas gravitacionales. Para esto Weber decidió utilizar el conocido fenómeno de la resonancia: si a un sistema físico que tenga una frecuencia de oscilación que le sea natural (un péndulo por ejemplo) le aplicamos una fuerza una y otra vez, precisamente con esa frecuencia, la amplitud de sus oscilaciones aumentará y aumentará. Weber pensó entonces en tomar un objeto con una frecuencia natural de oscilación igual a la de las ondas gravitacionales que esperaba detectar; aislarlo lo mejor posible de cualquier perturbación externa; enfriarlo para eliminar vibraciones asociadas a la temperatura del objeto, y esperar a que entrara en resonancia. En este caso, el objeto adecuado resultó ser una barra cilíndrica de aluminio de un metro y medio de largo, sesenta centímetros de diámetro y una tonelada de peso. Dado que existen muchos fenómenos físicos menos exóticos que pueden hacer oscilar la barra, como un temblor de tierra o un tren que pasa en la cercanía, por ejemplo, Weber construyó dos barras idénticas y las colocó a miles de kilómetros de distancia una de otra, razonando que si ambas barras entraban en resonancia al mismo tiempo y de manera similar, debería ser consecuencia de un fenómeno astrofísico y no de una simple perturbación local.

En diciembre de 1968 las barras de Weber finalmente detectaron algo simultáneamente, y durante los siguientes tres meses detectaron muchos más de estos eventos. A mediados de 1969 Weber anunció su descubrimiento al mundo científico. Los demás científicos, si bien con cierta incredulidad, celebraron la noticia y muchos se pusieron inmediatamente a construir barras como las de Weber, con el fin de iniciar el estudio de las ondas gravitacionales. El problema con el que se toparon fue que, cuando pusieron a funcionar sus barras, no lograron detectar nada. Weber continuaba anunciando nuevas observaciones en los congresos científicos, mientras los demás grupos experimentales mejoraban sus detectores, alcanzando precisiones incluso mayores a las de las barras de Weber y aun así seguían sin detectar nada. Por si fuera poco, cálculos teóricos mostraban que era simplemente imposible que las barras de Weber tuvieran la precisión requerida para detectar ondas gravitacionales provenientes de cualquier sistema astrofísico imaginable. Después de más de 10 años en esta situación, la comunidad científica acabó por concluir que

las observaciones de Weber no podían ser correctas, y que con toda seguridad Weber estaba interpretando algún ruido no identificado en sus aparatos, como si fueran mediciones reales. Weber, aunque ciertamente reconocido como el pionero en la construcción de detectores de ondas gravitacionales, terminó por convertirse en una figura trágica, a quien se miraba con cierta lástima cuando, muchos años después, todavía asistía a los congresos científicos para hablar sobre sus más recientes observaciones de ondas gravitacionales que nadie más podía ver.

Pero afortunadamente la historia no termina ahí. Para principios de los años ochenta varios grupos experimentales llegaron a la conclusión de que si bien Weber no había detectado en realidad ondas gravitacionales, la idea de lograr detectarlas no era tan descabellada, y debería buscarse un método diferente que tuviera mayores posibilidades de detección. Para ello se concentraron en la idea de un aparato conocido como un interferómetro. La idea básica es utilizar una propiedad de los fenómenos ondulatorios: cuando dos ondas chocan, al encontrarse sus crestas éstas se suman, produciendo una onda más grande, pero si se encuentra una cresta con un valle, ambas se cancelan y no obtenemos nada. Este fenómeno se conoce como interferencia constructiva en el primer caso, y destructiva en el segundo.

Como la luz es una onda electromagnética, se pueden observar fenómenos de interferencia cuando dos haces de luz cruzan caminos. Si separamos un haz de luz en dos haces, los enviamos en direcciones diferentes; los reflejamos de regreso, y los volvemos a combinar. Los dos haces presentarán interferencia. Si las distancias que recorrieron son iguales, la interferencia será constructiva y veremos un haz brillante. Si las distancias son distintas y la diferencia es justo tal que acabamos combinando una cresta con un valle, los haces se cancelan y no vemos nada. Fue precisamente un interferómetro de este tipo el que utilizaron Michealson y Morley en 1895, para intentar detectar diferencias en la velocidad de la luz.

La idea era entonces utilizar un interferómetro para intentar medir las pequeñas deformaciones producidas por el paso de una onda gravitacional. Para mediados de los ochentas ya existían varios interferómetros funcionando, algunos de docenas de metros de largo. Sin embargo, cálculos sencillos mostraban que éstos no eran lo suficientemente grandes, y para poder detectar las ondas gravitacionales eran necesarios interferómetros de dimensiones mucho mayores, con longitudes de varios kilómetros. A principios de los noventa, grupos de científicos en los Estados Unidos, Alemania, Italia, Francia, Gran Bretaña y Japón, lograron convencer a sus respectivas agencias gubernamentales de la importancia que la detección de ondas gravitacionales tendría para nuestra comprensión del Universo, y dio inicio la construcción de los grandes detectores.

A la fecha existen 5 grandes detectores de tipo interferómetro funcionando en distintos lugares  
10 -xx

del mundo: uno en Japón, de 300 metros de longitud (el proyecto TAMA); uno en Alemania, de 600 metros de longitud (el proyecto GEO600); uno en Italia, de 3 kilómetros de longitud (en proyecto VIRGO), y dos en los Estados Unidos, de 4 kilómetros de longitud (el proyecto LIGO). Los detectores están formados por dos túneles perpendiculares, dentro de los cuales se encuentran grandes tubos al vacío con espejos colgantes a ambos lados, donde la luz de potentes rayos láser rebota continuamente. Todos estos detectores se encuentran ya funcionando y tomando datos desde hace algunos años, aunque en realidad nadie espera que los dos más pequeños (el japonés y el alemán) tengan alguna posibilidad de una detección. Las esperanzas están puestas en los detectores gigantes de los proyectos VIRGO y LIGO.

La sensibilidad actual de los detectores kilométricos es apenas marginal y a la fecha aún no se ha producido ninguna detección. Cálculos estadísticos que toman en cuenta la sensibilidad de los detectores, así como la frecuencia con la que ocurren fenómenos astrofísicos lo suficientemente violentos como para que puedan observarse desde la Tierra, indican que con estos grandes detectores podemos esperar en promedio una detección cada 50 años, lo que no es particularmente prometedor. Es debido a esto que ya existen planes de mejorar la sensibilidad de los grandes detectores, sin tener que hacerlos aún más grandes, aumentando por ejemplo la potencia de los láseres, y mejorando el aislamiento sísmico de los espejos. De hecho, los detectores del proyecto LIGO en los Estados Unidos ya están en este momento en proceso de mejoramiento, por lo que se encuentran apagados. Se espera que dichas mejoras estén listas en el transcurso de los próximos 2 ó 3 años, y que para el año 2015 los detectores mejorados entren en funcionamiento. Será a partir de ese momento cuando las cosas se pondrán interesantes. Los mismos cálculos estadísticos indican que los nuevos detectores deberían ser capaces de detectar señales de ondas gravitacionales provenientes de eventos astrofísicos violentos, al ritmo de una o dos veces por semana.

¿Y qué tipo de fenómenos astrofísicos esperamos observar? La naturaleza frecuentemente nos da sorpresas, por lo que siempre es posible que observemos fenómenos totalmente inesperados. Sin embargo, de momento esperamos observar ondas gravitacionales provenientes de algunos de los fenómenos más violentos en el Universo. En particular, las fuentes más prometedoras son las colisiones de dos estrellas de neutrones, o de dos agujeros negros, eventos tan violentos que son capaces de convertir el 10% de la masa inicial en energía. Los nuevos detectores deberían ser capaces de observar dichos eventos a distancias mucho más allá de nuestra propia Galaxia, incluso más allá del gran cúmulo de Virgo, una colección de cerca de 2000 galaxias que se encuentran a una distancia de unos 60 millones de años luz de nosotros.

## Conclusión

Las ondas gravitacionales representan la última gran predicción de la teoría de la relatividad general de Einstein, aún sin confirmar de manera directa. Aun cuando existe evidencia indirecta de su existencia en el decaimiento de la órbita del pulsar binario de Hulse y Taylor, seguimos esperando una detección directa de las ondas.

A casi un siglo de que Einstein desarrollara su teoría, la detección de ondas gravitacionales parece estar finalmente a la vuelta de la esquina. No es del todo imposible que la primera detección ocurra precisamente en el 2015, cuando la teoría cumpla cien años. Dicha detección no sólo confirmará la última predicción de Einstein, sino que también abrirá una nueva ventana al Universo. Las ondas gravitacionales representan una nueva forma de observar el cosmos, usando la gravedad en vez de la luz, y promete una verdadera revolución en nuestra comprensión de algunos de los fenómenos más espectaculares y violentos en el Universo. La era de la astronomía de ondas gravitacionales está por comenzar.

## Bibliografía

1. "La sinfonía inacabada de Einstein", Marcia Bartusiak, Editorial Océano, Barcelona, 2002.
2. "La gran ilusión III", Jorge Flores Valdés, colección "La Ciencia Desde México", volumen 41, Fondo de Cultura Económica, 1988.
3. Proyecto LIGO, <http://www.ligo.caltech.edu>
4. Proyecto VIRGO, <https://www.cascina.virgo.infn.it>
5. Proyecto GEO600, <http://www.geo600.org>

