

**Carlos Kozameh**Instituto de Física Enrique Gaviola,  
Universidad Nacional de Córdoba

# Las ondas gravitacionales

## Un triunfo del ingenio humano

**L**a formulación de la teoría de la relatividad general por parte de Albert Einstein en 1915 representó un cambio conceptual mayor en nuestra manera de explicar la interacción gravitacional. En lugar de concebirla, según Newton lo había hecho a fines del siglo XVII, como una fuerza por la que los cuerpos con masa interactúan a distancia, recurrió para explicarla a la idea de que el espacio y el tiempo podrían considerarse distintos de lo que indica el sentido común, que era también parte de

la ciencia occidental desde Euclides. El espacio, así, tendría una geometría variable y dinámica, de suerte que se vería alterado en las proximidades de cualquier cuerpo astronómico, con la consecuencia de que las trayectorias de los rayos de luz (llamadas las *geodésicas* de la luz) se verían curvadas por la presencia de la materia. Algo similar ocurriría con el fluir del tiempo, el que no sería homogéneo para cualquier observador, sino que dependería de la presencia y magnitud de cuerpos astronómicos en su cercanía. Por eso los relojes internos de los satélites del

### ¿DE QUÉ SE TRATA?

Primero la predicción y luego la detección de las ondas gravitacionales fue una labor que combinó la matemática, la física y la ingeniería. Puede considerarse un triunfo del ingenio humano que comenzó en 1915 con la visión de una mente brillante y culminó un siglo después.



Vistas aéreas de los observatorios LIGO en Harnford, Washington (derecha) y en Livingston, Louisiana. Cada uno tiene dos brazos perpendiculares que se extienden por 4km.

sistema GPS que orbitan la Tierra a más de 20.200km de la superficie de esta (o más de 26.600km del centro del planeta), registran tiempos distintos de los medidos por los relojes terrestres, pues unos y otros están a diferentes distancias del centro de la gravitación terrestre.

Las elucubraciones teóricas de Einstein, hechas con el solo auxilio de lápiz y papel, parecieron poder explicar ciertos fenómenos que habían sido observados para los que la teoría de Newton no tenía explicación, e incluso sugirieron la existencia de otros que no habían sido observados, como dicho desvío de la luz. Con el correr de los años, se logró medir experimentalmente algunos de esos fenómenos, en ciertos casos con asombrosa precisión.

Hoy los científicos analizan la interacción gravitacional (o el campo gravitacional) mediante modelos matemáti-



cos de un espacio abstracto de cuatro dimensiones (las tres habituales más el tiempo) que llaman el *espacio-tiempo*. La variación de la geometría del espacio-tiempo explica la gravitación: la ley que dicta su comportamiento está dada justamente por las ecuaciones de Einstein. Un ejemplo simple: si los planetas orbitan alrededor del Sol no es como consecuencia de una fuerza emanada de este que los mantiene en sus órbitas, sino debido a que la pre-

sencia del Sol, que posee el 99% de la masa de todo el sistema solar, modifica el espacio a su alrededor, como cuando hundimos con el dedo una membrana plana deformable. Los planetas, en consecuencia, se trasladan por un espacio que no es plano sino curvo, a semejanza del sector hundido de dicha membrana.

Podríamos también perturbar la superficie de la membrana (con un golpe, por ejemplo), en cuyo caso apreciaríamos cómo se generan vibraciones, que no son otra cosa que modificaciones de la geometría de la membrana. Así, el espacio matemático cuadriddimensional que representa nuestro universo puede verse afectado por algún acontecimiento astronómico en el cual intervengan cuerpos muy masivos (la danza gravitacional de un par de agujero negros, por ejemplo), que dé origen a vibraciones en la geometría del espacio-tiempo.

Este carácter dinámico del espacio-tiempo es una de las grandes predicciones de la relatividad general einsteiniana. Su corolario inmediato es que una perturbación de la geometría del espacio-tiempo debería propagarse como una onda. El mismo Einstein demostró este corolario en 1916, unos meses después de la formulación de su teoría. Dedujo que la pequeña perturbación de un espacio plano (es decir, desprovisto de materia masiva) que constituye el campo gravitacional se propaga en forma ondulatoria. Eso es lo que hoy llamamos *ondas gravitacionales*, que se desplazan con la velocidad de la luz.

Lo último era particularmente importante para Einstein, que en 1905, en su teoría de la relatividad restringida (la cual no incorporaba la gravitación), había postulado que las ondas electromagnéticas se propagan con velocidad constante en un espacio plano. Para la coherencia de ambas teorías era crucial que la perturbación gravitacional fuera también una onda (o sea, que verificara la llamada *ecuación de onda*), y que se propagara con la misma velocidad, es decir, lo que llamamos la velocidad de la luz.

Este hallazgo matemático de hace exactamente cien años constituyó el primer peldaño de una larga escalera de deducciones y descubrimientos que desembocó en la reciente detección directa de las tan buscadas ondas gravitacionales. Ello se realizó en dos observatorios construidos para tal fin en los Estados Unidos (respectivamente en Livingston, Louisiana, y Hanford, Washington) como parte de un proyecto internacional llamado LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*, es decir observatorio de ondas gravitacionales por interferometría láser).

La construcción teórica, sin embargo, no estaba terminada en 1916: durante los siguientes dos años, Einstein continuó concentrado en sus novedosas ecuaciones. En 1918 publicó un par de resultados que también se revelaron cruciales para la reciente detección de LIGO. En primer lugar, calculó la llamada *fórmula cuadrípolar*, una expresión matemática que vincula la forma de las on-

das gravitacionales con las características de un sistema gravitacional aislado, como podría ser la fusión (o *coalescencia*) de un par de estrellas de un grupo binario, una supernova, etcétera. En segundo lugar, dedujo la relación que vincula la pérdida de masa de un sistema gravitacional con la energía transportada fuera del sistema por la onda saliente.

Estos resultados permitieron a los investigadores estudiar la dinámica de las fuentes astrofísicas que emiten las ondas gravitacionales ya que, una vez emitidas, dichas ondas no son alteradas en su viaje por el espacio-tiempo y llegan al observador con las características con que se originaron.

La pregunta que se podrá hacer el lector después de lo explicado es cómo se detectan las ondas gravitacionales. La respuesta proviene de la misma teoría de la relatividad general: si el campo gravitacional es una curvatura del espacio-tiempo que se propaga a la velocidad de la luz, basta con medir esa curvatura para detectar dichas las ondas.

Para hacerlo, una posibilidad es emplear detectores que no estén sometidos a ningún tipo de fuerza. Esos detectores describen las mencionadas trayectorias geodésicas en el espacio-tiempo, de las que son ejemplos los satélites que orbitan la Tierra, o también los astronautas cuando no están sujetos a su nave y se desplazan libres de fuerzas en el espacio. La teoría de Einstein permite demostrar que la aceleración relativa entre geodésicas vecinas es proporcional a la curvatura del espacio y a la distancia entre dichas geodésicas. En consecuencia, la medición de esta aceleración nos permite obtener la curvatura.

En este principio se basaron los físicos Ronald Drever (de origen escocés y profesor emérito del California Institute of Technology), y los estadounidenses Kip Thorne (también profesor emérito del Caltech) y Rainer Weiss (profesor emérito del Massachusetts Institute of Technology) para idear un método de detección de las ondas gravitacionales sin necesidad de abandonar la superficie de nuestro planeta. Consiste en montar un sistema interferométrico láser con brazos perpendiculares de varios kilómetros de longitud en cuyos extremos haya espejos muy sensibles aislados de toda interacción. El sistema permite detectar la aceleración relativa de unos espejos con relación a los otros, producida por ondas gravitacionales llegadas en forma perpendicular a los brazos del detector. Para aplicar el método, derivado de manera directa de la concepción geométrica del espacio-tiempo, nació el proyecto LIGO en 1988.

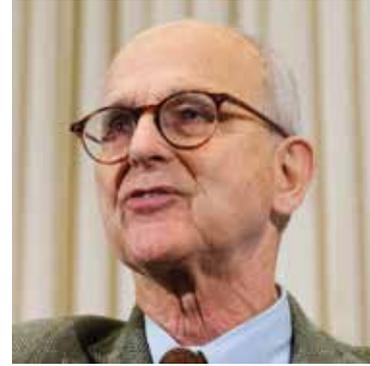
El esfuerzo tecnológico que demandó alcanzar los niveles adecuados de precisión fue tan grande que hasta septiembre de 2015 algunos miembros de LIGO (además de muchos físicos e ingenieros) dudaban de que las ondas gravitacionales llegasen alguna vez a ser medidas.



Ronald Drever



Kip Thorne



Rainer Weiss

Fue posible hacerlo usando una versión refinada de la mencionada fórmula cuadripolar, que data de 2015 y fue producto del trabajo pionero del matemático británico de origen austriaco Hermann Bondi (1919-2005) y de sus colaboradores en la década de 1960, perfeccionada en la década siguiente con los aportes de otros dos británicos, Roger Penrose y Stephen Hawking. Por esa vía fue posible definir matemáticamente con precisión los conceptos de agujero negro, masa y momento de una fuente aislada, así como la radiación gravitacional, y sobre la base de ellos obtener fórmulas exactas para la pérdida de masa y la variación del momento lineal de las fuentes a partir de la radiación gravitacional que emiten.

Por otra parte, el avance de los métodos numéricos para la resolución de las ecuaciones de Einstein permitió en 2009 cómo se produce la coalescencia de dos agujeros negros. Esos resultados estaban listos en el momento de la detección de LIGO y fueron usados para determinar las masas y los espines de los agujeros negros iniciales, la masa y el espín final del agujero negro remanente y la radiación emitida. Esto se hizo mediante un refinado ajuste de los parámetros de la simulación con la señal observada.

Resulta difícil dar una estimación certera de la inmensa cantidad de personas que contribuyeron a lo largo de décadas para que esta detección de LIGO fuese posible. Sin duda, se trató de un notable triunfo de un esfuerzo

de investigación científica que comenzó hace 100 años. Quizá la satisfacción más grande que un físico teórico puede tener es enterarse de la comprobación experimental de su teoría: de estar entre nosotros, Einstein habría recibido la noticia con una enorme sonrisa.

La detección de las ondas gravitacionales confirma que la gravitación es una interacción de la materia completamente diferente de las demás conocidas. Hoy los físicos no razonamos más sobre una fuerza gravitatoria como la imaginara Newton. Científicamente no concebimos más al espacio y al tiempo como aspectos separados del mundo material, sino como una única entidad: el espacio-tiempo. Y asignamos a este una geometría dinámica, en cuyo marco la materia curva el espacio y las perturbaciones que causa en el tejido espacio-temporal se propagan como ondas a la velocidad de la luz.

Podemos ahora soñar con los nuevos descubrimientos que LIGO y los futuros observatorios de ondas gravitacionales nos tienen reservados para el futuro, en contradicción con quienes se pronunciaron inicialmente contra el financiamiento de LIGO con el argumento de que solo serviría para comprobar la teoría de Einstein. Hoy advertimos que con estos observatorios podremos seguir de cerca la complicada dinámica de los agujeros negros y recopilar información observacional que colaborará a mejorar nuestra comprensión de la evolución estelar. ¡Bienvenidos a la era de la astronomía gravitacional! 

## LECTURAS SUGERIDAS

'Introducción a LIGO y a las ondas gravitacionales', en <http://www.ligo.org/science/overview.php>.

**GANGUIA** (ed.), 2007, *El universo de Einstein*, Eudeba, Buenos Aires.

Los capítulos 'Olas espaciotemporales' escrito por Diego Harari y 'Gravitomagnetismo' escrito por el autor de este artículo se refieren al tema tratado acá.



**Carlos Kozameh**

Doctor (PhD) en física, Universidad de Pittsburgh.

Investigador principal del Conicet en el Instituto de Física Enrique Gaviola, UNC.

Profesor titular, UNC.