

Ondas gravitacionales

Gerardo F.
Torres del Castillo

Una de las predicciones de la teoría general de la relatividad (también llamada teoría einsteiniana de la gravitación), que no ha sido confirmada aún en forma directa, es la existencia de ondas gravitacionales. La gravitación es una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza y, a diferencia de las otras tres fuerzas fundamentales (la electromagnética, la débil y la fuerte), tiene un carácter universal; es decir, afecta a toda la materia. La gravitación es la interacción más importante a gran escala y determina la estructura del universo; en cambio, a nivel microscópico, su presencia es prácticamente despreciable.

La primera teoría (en el sentido actual del término) acerca de la gravitación fue la teoría de Newton, la cual permite explicar en forma bastante precisa los movimientos planetarios (aunque no siempre se consideró así; durante los siglos XVII y XVIII parecía que la teoría de Newton no era capaz de reproducir los movimientos de Júpiter y Saturno, hasta que Laplace demostró que ello se debía al método de cálculo empleado). De acuerdo con la teoría de la gravitación de Newton, la interacción gravitacional se propaga instantáneamente, es decir, con una velocidad infinita. Este hecho hace incompatible la teoría gravitacional de Newton con la teoría especial de la relatividad (esta-

blecida en su forma actual por Einstein en 1905), ya que esta última (confirmada ampliamente en forma experimental), entre otras cosas, no permite señales o interacciones que se propaguen más rápidamente que la luz. La incompatibilidad mencionada tuvo como consecuencia que en las primeras décadas de este siglo se buscara una nueva teoría de la gravitación acorde con los resultados de la teoría especial de la relatividad. Así, en 1915, guiado por el llamado principio de equivalencia (que en su forma débil corresponde al hecho, ya conocido por Galileo y Newton, de que la aceleración producida por el campo gravitacional en un punto del espacio sobre cualquier cuerpo colocado allí, no depende de las características de éste) y el formalismo de la geometría diferencial, Einstein obtuvo una teoría para el campo gravitacional que, en el caso de campos débiles y cuerpos con velocidades mucho menores que la de la luz, lleva prácticamente a los mismos resultados que la teoría de Newton. Mientras que en la teoría de Newton, al igual que en la física clásica, se supone que el espacio y el tiempo son absolutos e independientes entre sí, en la teoría de Einstein el espacio y el tiempo forman una sola entidad cuyas características dependen de la materia presente y el campo gravitacional corresponde a la curvatura del espacio-tiempo.

Aparte de la profunda diferencia conceptual entre las teorías de la gravitación de Newton y de Einstein, la teoría de Einstein predice diversos efectos que no se pueden derivar de la teoría de Newton. Varios de estos efectos han sido



confirmados experimentalmente y, a pesar de que se han propuesto otras teorías posteriores a la de Einstein, esta es la teoría (no cuántica) más satisfactoria con la que se cuenta hasta ahora.

En la teoría de la gravitación de Newton, la órbita de un planeta debe ser una elipse con una orientación fija en el espacio; en cambio, en la teoría de Einstein, dicha órbita es una curva más complicada, similar a una elipse cuyos ejes rotan en el mismo sentido que el planeta. Para los planetas del sistema solar esta precesión de los ejes es pequeñísima y es más notoria en el caso de Mercurio. Ya desde mediados del siglo pasado se conocía la precesión de la órbita de Mercurio y de las dificultades de la teoría de Newton para explicarla. El cálculo basado en la teoría general de la relatividad concuerda bastante bien con las mediciones.

Otro efecto que, a pesar de su pequeñez, ha sido verificado satisfactoriamente es la desviación de los rayos de luz por un campo gravitacional. Las teorías de la gravitación de Newton y de Einstein establecen que un rayo de luz que pase, por ejemplo, cerca del Sol, se desvía un poco de una trayectoria rectilínea, pero de la teoría de Einstein se obtiene un ángulo de desviación que es el doble del predicho por la teoría de Newton. La primera medición de esta desviación se realizó durante el eclipse de Sol ocurrido en mayo de 1919 y, después de esta confirmación de la teoría general de la relatividad, Einstein comenzó a ser conocido mundialmente de tal manera que, incluso ahora, es considerado por la gente no relacionada con el estudio de la física como el principal ejemplo de un científico o como el máximo exponente de la genialidad (un fenómeno similar, más actual, que también ilustra lo que puede lograr la publicidad, es la imagen que mucha gente tiene de Stephen Hawking).

Una predicción de la teoría general de la relatividad, que la distingue de la teoría de la gravitación de Newton, es la existencia de ondas gravitacionales. A diferencia de la teoría de Newton, la teoría de Einstein supone que la interacción gravitacional, manifestada por la curvatura del espacio-tiempo, se propaga no con una velocidad infinita, sino con la velocidad de la luz. Un cuerpo o conjunto de cuerpos en movimiento puede generar un campo gravitacional variable que, de acuerdo con la teoría, se propaga como ondas similares a las ondas electromagnéticas. De hecho, al considerar la teoría general de la relatividad en la aproximación lineal (es decir, despreciando en las ecuaciones para el campo

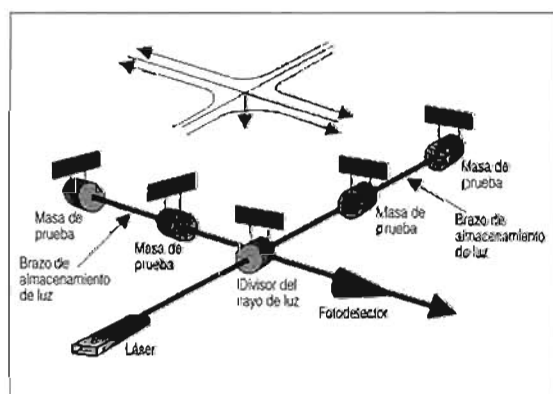


FIGURA 1 Los detectores de ondas gravitacionales LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*) son interferómetros de brazos iguales en los que un haz de láser se refleja en espejos colgantes que sirven como masas de prueba. Una onda gravitacional incidente comprime un brazo del interferómetro al tiempo que estira el otro, produciendo una diferencia en los tiempos de viaje del haz de luz en los dos brazos. Esta diferencia se registra en el patrón de interferencia que se forma al recombinar los haces en el fotodetector. Los brazos tienen una longitud de cuatro kilómetros.



gravitacional algunas contribuciones supuestamente pequeñas, de tal manera que las ecuaciones resultantes puedan tratarse más fácilmente) se halla que las ondas gravitacionales deben tener varias propiedades en común con las ondas electromagnéticas, por ejemplo, presentan dos tipos de polarización y llevan impulso y energía.

Los primeros intentos hechos para detectar ondas gravitacionales (las cuales deben estar produciendo continuamente por la explosión de estrellas o, simplemente, por el movimiento orbital de cuerpos con gran masa) fueron realizados alrededor de 1965 por Joseph Weber. El detector diseñado por Weber consiste en un cilindro sólido de medio metro de diámetro, y uno o dos metros de largo. La idea básica es que al llegar una onda gravitacional al cilindro, en éste se produzcan oscilaciones que puedan ser detectadas convirtiendo las vibraciones en señales eléctricas. Al estimar la intensidad de las ondas gravitacionales producidas por los fenómenos astronómicos conocidos, se encuentra que, debido a las grandes distancias involucradas y a la pequeñez de la constante de gravitación universal, la cual determina el acoplamiento de la materia con el campo gravitacional, estas ondas deben producir en el detector movimientos extremadamente pequeños, del orden del tamaño del núcleo atómico, por lo que su detección resulta muy difícil. A pesar de que Weber ha reportado la detección de ondas gravitacionales mediante sus instrumentos, otros grupos de experimentadores no han podido reproducir sus resultados.

Tratando de mejorar la sensibilidad, existe actualmente otra clase de detectores en operación o en construcción en diversos lugares del mundo, cuyo funcionamiento está basado en la medición óptica de las variaciones que debe producir una onda gravitacional en la separación entre varios cuerpos que forman parte del detector. Puesto que una onda gravitacional corresponde a ondulaciones del espacio-tiempo, al pasar una de estas ondas por donde haya un conjunto de cuerpos separados entre sí, hará que las distancias entre ellos varíen y, puesto que estos desplazamientos son muy pequeños, una técnica experimental adecuada para medirlos es la interferometría óptica. Haciendo, por ejemplo, que un haz de láser rebote entre espejos distantes, las variaciones de la separación entre los espejos producidas por una onda gravitacional produciría cambios en el patrón de interferencia del haz que sirven para detectar el paso de la onda. El interferómetro del INFN de Pisa,

junto con la Universidad de París en Orsay, que es uno de los más grandes, tiene una longitud de tres kilómetros.

Uno de los problemas comunes en los detectores situados en la Tierra es que las oscilaciones producidas por una onda gravitacional son muy débiles, por lo que los detectores deben aislarse adecuadamente para no confundir el efecto de una onda gravitacional con alguna vibración producida de otra forma. Una manera de resolver este problema es situar los espejos del interferómetro lejos del suelo, por ejemplo, a bordo de satélites en órbita alrededor de la Tierra e incluso en órbita alrededor del Sol. Se han propuesto varios detectores de este tipo, los cuales servirían también para realizar otros experimentos.

Aun cuando la predicción que hace la teoría general de la relatividad acerca de las ondas gravitacionales no se ha confirmado directamente todavía, existe evidencia indirecta de que esta predicción de la teoría también es correcta. En 1974 se descubrió mediante el radiotelescopio de Arecibo (Puerto Rico) un par de cuerpos muy compactos, probablemente un par de estrellas de neutrones, que giran alrededor de su centro de gravedad común separadas por una distancia relativamente pequeña, de tal manera que su periodo orbital es de 7.751939337 horas. La razón por la que esta "estrella doble" fue descubierta es que uno de los cuerpos que lo forman es un pulsar, esto es, un objeto del cual recibimos radiación electromagnética en forma de pulsos con una notable periodicidad. De acuerdo con la teoría general de la relatividad, un sistema así debe estar emitiendo ondas gravitacionales que llevan parte de su energía y, puesto que se ha logrado determinar en forma muy precisa la órbita que siguen sus componentes, se puede calcular la energía que se debe estar perdiendo por la radiación. Esta pérdida de energía se traduce en un aumento gradual del periodo orbital y los datos acumulados en más de veinte años de observación de este sistema, conocido como PSR 1913+16, muestran que, en efecto, dicho periodo ha variado en una cantidad que coincide con lo predicho por la teoría en una parte en 10^{14} , es decir, una parte en cien millones de millones, lo que significa una concordancia superior a la obtenida en cualquier otra área de la física o de la ciencia. Otro ejemplo de la precisión que se puede alcanzar mediante las teorías físicas (y, particularmente, mediante los experimentos) lo da la electrodinámica cuántica (que proviene de la combinación de la mecánica cuántica y de la relatividad especial); el cálculo del momento magnético del electrón basado en la electrodinámica cuántica coincide con el

valor determinado experimentalmente en una parte en 10^{11} es decir, una parte en cien mil millones.

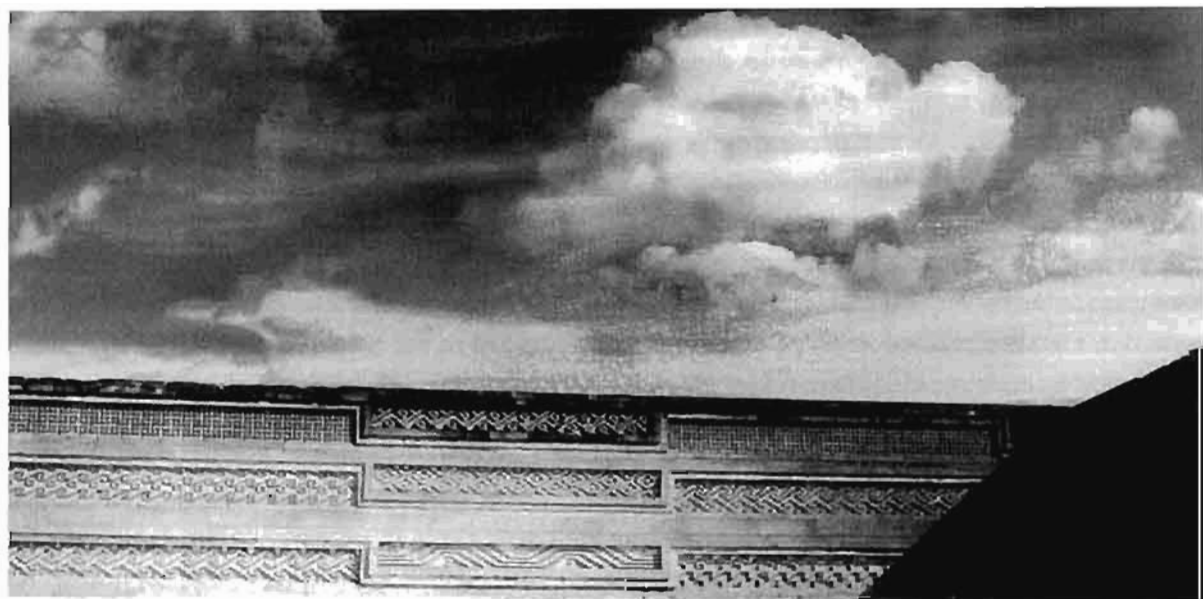
La detección de las ondas gravitacionales en forma directa no sólo constituiría una esperada confirmación de la teoría de Einstein, sino que proporcionaría una nueva "ventana" para observar el universo. La experiencia obtenida hasta ahora muestra que al ampliar los métodos de observación, se descubren múltiples detalles que revelan la estructura e historia del universo. Las primeras observaciones astronómicas, que en la Antigüedad se hacían a simple vista, fueron mejoradas con el desarrollo del telescopio, el cual es capaz de captar mucha más luz que la que recibe el ojo humano. El uso de la fotografía, primero, y de los detectores electrónicos actuales, ha incrementado enormemente la capacidad de recolectar la luz procedente de las estrellas y de otros objetos, permitiendo así conocer cada vez más la composición y distribución de los cuerpos celestes. La detección de las ondas de radio, los rayos X, la radiación infrarroja y la ultravioleta procedente de diversos lugares del universo ha incrementado las posibilidades de conocer cómo es y cómo funciona el mismo, ya que algunas de estas formas de radiación son capaces de atravesar regiones que son opacas a la luz visible o, directamente, la producción de estas otras formas de radiación electromagnética revela por sí la ocurrencia de procesos desconocidos previamente. Por ejemplo, los pulsares fueron descubiertos por medio de la radioastrono-



mía, mientras que algunos objetos que posiblemente sean agujeros negros han sido identificados por la emisión de rayos X. Es de esperarse que la detección de la radiación gravitacional agregue una forma complementaria de obtener información sobre el universo y, posiblemente, lleve al descubrimiento de fenómenos astronómicos no revelados por los métodos de observación disponibles actualmente.

A pesar de la importancia de la teoría gravitacional de Einstein, de la misma forma como la incompatibilidad de la teoría de la gravitación de Newton con la relatividad especial llevó a la búsqueda de una nueva teoría de la gravitación que la reemplazara, desde los años veinte se ha buscado una teoría de la gravitación que tome en cuenta la naturaleza cuántica de la materia y que sustituya la teoría de la gravitación de Einstein. Particularmente en los últimos años se han logrado varios progresos en diferentes enfoques a este problema, pero la búsqueda ha resultado más larga que la que condujo a Einstein a formular su teoría, que sigue siendo un ejemplo de los logros del intelecto humano.

Gerardo F. Torres del Castillo es investigador del Departamento de Matemáticas del Instituto de Ciencias de la Universidad Autónoma de Puebla.



© Gerardo Suter. Frente al muro de las palabras 3, de la serie El archivo fotográfico del profesor Retus, 1985