Ondas Gravitacionales

Juan David García Fuentes
Universidad de Murcia
3º de Física

1. RESUMEN

Las ondas gravitacionales son una predicción de la teoría de la Relatividad General de Einstein que todavía no ha sido comprobada directamente. Aparecen al linealizar la ecuación de campo de Einstein. Son disturbios en el espacio-tiempo causados por el movimiento de la materia y la energía, y se propagan a la velocidad de la luz. Debido a que son ondas extremadamente débiles, la única forma de detectar su presencia ha sido de forma indirecta por medio del estudio de los pulsares binarios (Hulse y Taylor, Premio Nobel de Física 1993). Actualmente existen varios esfuerzos para detectar ondas gravitacionales.

2. INTRODUCCIÓN

Una onda, tal y como la entendemos, es una perturbación "viajera" que presenta una doble periodicidad, espacial y temporal.

Continuamente realizamos acciones que tienen que ver con fenómenos ondulatorios (escuchar la radio, hablar por teléfono móvil, utilizar el microondas…). Sin ir más lejos, vemos gracias a que nuestro cuerpo tiene incorporado un receptor de ondas electromagnéticas cuyas longitudes de onda pertenecen a un cierto intervalo (400-750 nm).

La teoría electromagnética nos dice que una carga que se encuentra en movimiento acelerado pierde energía debido a que está generando ondas de tipo electromagnético. Del mismo modo parece "normal" pensar que una masa acelerada produzca algún tipo de ondas, que por estar provocadas por un campo gravitatorio se denominrían ondas gravitacionales.

La definición de onda gravitacional podría ser la siguiente: Una onda gravitacional es una perturbación en el espacio-tiempo que se propaga en todas direcciones a la velocidad de la luz. Además son ondas transversales.

Este tipo de ondas aún no se han detectado directamente, pero hay evidencias indirectas de que existen.

El estudio de este tipo de ondas sería una gran ayuda en el estudio del universo. Recibiríamos información adicional a la que ahora tenemos que es la luz que nos llega, lo cual podría proporcionarnos información que ahora mismo no tenemos.

Algunas fuentes de ondas gravitacionales son: pulsaciones pequeñas de objetos compactos, radiación por objetos en órbita alrededor de un agujero negro, movimiento lento en campos gravitacionales débiles, colisiones entre agujeros negros y estrellas de neutrones, rotación rápida de cuerpos no esféricos, etc.

3. APARICIÓN DE LAS ONDAS GRAVITACIONALES

La aparición de estas ondas data de 1916, cuando Einstein publicó la teoría de la Relatividad General. La existencia de este tipo de ondas es una de sus consecuencias por este motivo se empezó a pensar en su existencia.

Las ondas gravitacionales aparecen al linealizar la ecuación de campo de Einstein:

$$E_{ik} = 8\pi \frac{G}{c^4} T_{ik}$$

En el espacio métrico de Minkowski, la matriz de coeficientes de la métrica es una matriz diagonal A=diag(-1,1,1,1). Por lo tanto los coeficientes de una métrica correspondientes a un espacio casi plano (como el de nuestro universo, lejos de los cuerpos muy masivos) se podrán escribir como:

$$g_{\alpha\beta}(x) = \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta}(x)$$

donde la h(x) representan pequeñas perturbaciones con respecto al caso plano.

Cuando se linealiza la ecuación de campo de Einstein se llega a una expresión diferencial que corresponde a la conocida ecuación de ondas.

$$\eta^{\alpha\beta} \frac{\partial^2 f}{\partial x^\alpha \partial x^\beta} = -\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} + \vec{\nabla}^2 f = 0.$$

La función incógnita en esta ecuación es la perturbación producida por la masa (antes llamada h), de modo que al espacio tiempo (plano) se le superpone este término que es el de una onda gravitacional. La solución a esta ecuación es una del tipo:

$$f(x) = ae^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}}$$

Una solución armónica donde hay que tener en cuenta que estamos en un espacio de cuatro dimensiones

$$\mathbf{k}\cdot\mathbf{x} = -k^t t + \vec{k}\cdot\vec{x}$$

Si nos limitamos al caso de una sola dimensión espacial la solución general es de la forma:

$$f(z,t) = f_1(z-t) + f_2(z+t)$$

Y si nos quedamos con la que se propaga hacia z crecientes, el elemento de línea queda como:

$$ds^2 = -dt^2 + [1 + f(t-z)]dx^2 + [1 - f(t-z)]dy^2 + dz^2.$$

Que proviene de sumar a la matriz diagonal de la métrica de Minkowski otra matriz que representa una onda propagándose en dirección z:

$$h_{\alpha\beta}(t,z) = \begin{array}{c} \\ t \\ x \\ y \\ z \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} t & x & y & z \end{array} \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{array} f(t-z)$$

El elemento de línea anterior representa una onda propagándose en dirección z y sentido de las z crecientes, con velocidad 1 (la de la luz).

Esta onda solución es una aproximación muy buena de la solución de la ecuación de campo de Einstein cuando su amplitud es muy pequeña. También tienen la ventaja de que pueden sumarse para producir nuevas ondas del mismo tipo que resuelven la ecuación de Einstein en las mismas condiciones.

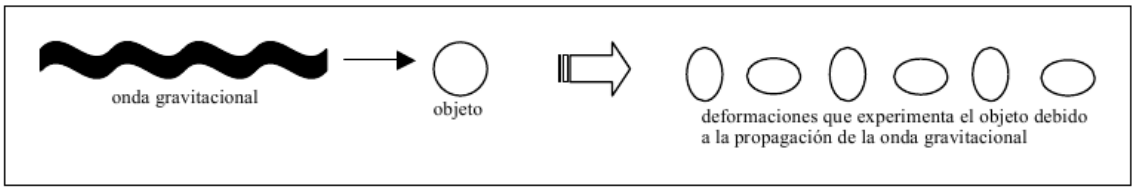
4. CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS GRAVITACIONALES

El universo no es especialmente sensible a la radiación gravitatoria ya que hay numerosas fuentes de éstas. Pero la debilidad de la interacción gravitatoria hace que su detección de forma directa sea complicada (aún no se han podido realizar mediciones directas).

Como ya se ha comentado, las ondas gravitacionales se propagan a la velocidad de la luz en todas direcciones.

Son ondas transversales, por lo que se pueden polarizar y podemos resolver cualquier tipo acudiendo a la resolución de dos ondas con polarizaciones ortogonales (igual que en el estudio de la luz con las leyes de Fresnel). Veamos cómo interactúa una onda de este tipo al encontrarse con un cuerpo con masa:

Al ser ondas transversales el cuerpo se deformará en la dirección de vibración de la onda (debido a la acción del campo gravitatorio), y en su plano perpendicular (cuando éste deje de actuar). Es decir, el cuerpo es estirado en una dirección y comprimido en la otra y viceversa. Esto se repite mientras la onda esté interactuando con el cuerpo.



Lo mismo pero con ondas polarizadas de forma distinta:

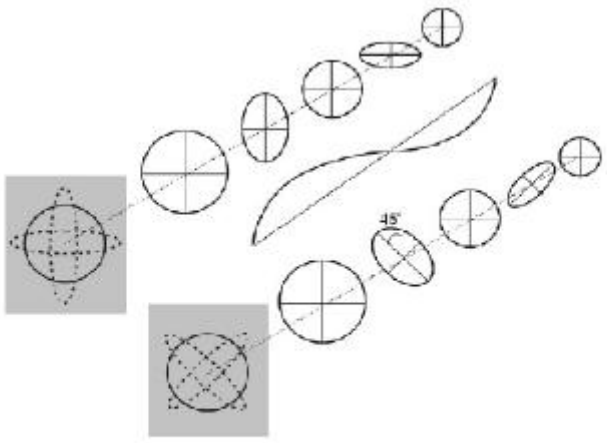


Figure: effect of the two polarisations (+,x) on a ring of particles. The pol. act similarly, but differ by 45°)

Otra de las características conocidas de las ondas es que transportan energía, de forma que surge de manera natural pensar que las ondas gravitacionales también transportan energía, la cual extraen de sus fuentes. No hay ninguna expresión formal que determine la energía que transportan las ondas. Para explicar de una forma rigurosa este aspecto se necesita acudir al pseudotensor de Einstein (cosa que yo no voy a hacer).

Estudiemos un caso concreto, el de la Tierra trasladándose alrededor del Sol (velocidades muy inferiores a la de la luz). Asumamos que se mueven en un plano y que están separadas por una distancia r. Las masas seguirán las órbitas obtenidas a partir de las ecuaciones de Kepler, sin embargo la órbita representa un cambio en el momento cuadrupolar del sistema, por lo que está radiando. La potencia radiada por el sistema es:

$$P = \frac{dE}{dt} = -\frac{32}{5}\frac{G^4}{c^5}\frac{(m_1 m_2)^2(m_1+m_2)}{r^5}$$

Si sustituimos los datos se obtiene que P=200w, algo realmente insignificante frente a la energía electromagnética radiada por el Sol 3.8e28w.
En teoría, esta pérdida de energía del sistema provocaría la caída de la Tierra al Sol, sin embargo la energía total de la Tierra en su movimiento es de 1.1e+36 J, mientras que se pierden 200J cada segundo, que se traduciría en un acercamiento de 1e-15m cada día…

5. PROBLEMAS PARA LA DETECCIÓN DIRECTA DE ONDAS GRAVITACIONALES

La detección directa de ondas gravitacionales no ha sido posible debido que son muy débiles. La fuerza gravitacional es la más débil de las fuerzas fundamentales, y por esta razón sus manifestaciones lejanas son difíciles de detectar. La intensidad gravitacional disminuye con el cuadrado de la distancia, de la misma forma que la intensidad luminosa. Sin embargo, a la misma distancia una fuente luminosa es mucho más potente que una fuente gravitacional, debido a que la fuerza electromagnética, responsable de la emisión luminosa, es mucho más fuerte que la fuerza gravitacional. Por este motivo, para detectar ondas gravitacionales directamente necesitaríamos tener la fuente muy cercana a nosotros o tener una fuente extremadamente energética.

6. DETECCIÓN INDIRECTA DE ONDAS GRAVITACIONALES

Hemos dicho que no se han detectado directamente ondas gravitacionales, pero hay evidencias experimentales que sugieren su existencia, hechos que se pueden explicar acudiendo a la existencia de este tipo de ondas.

En 1974 Russell Hulse y Joseph Taylor, universidad de Princeton (premios nobel en 1993) descubrieron un pulsar llamado PSR1913+16.

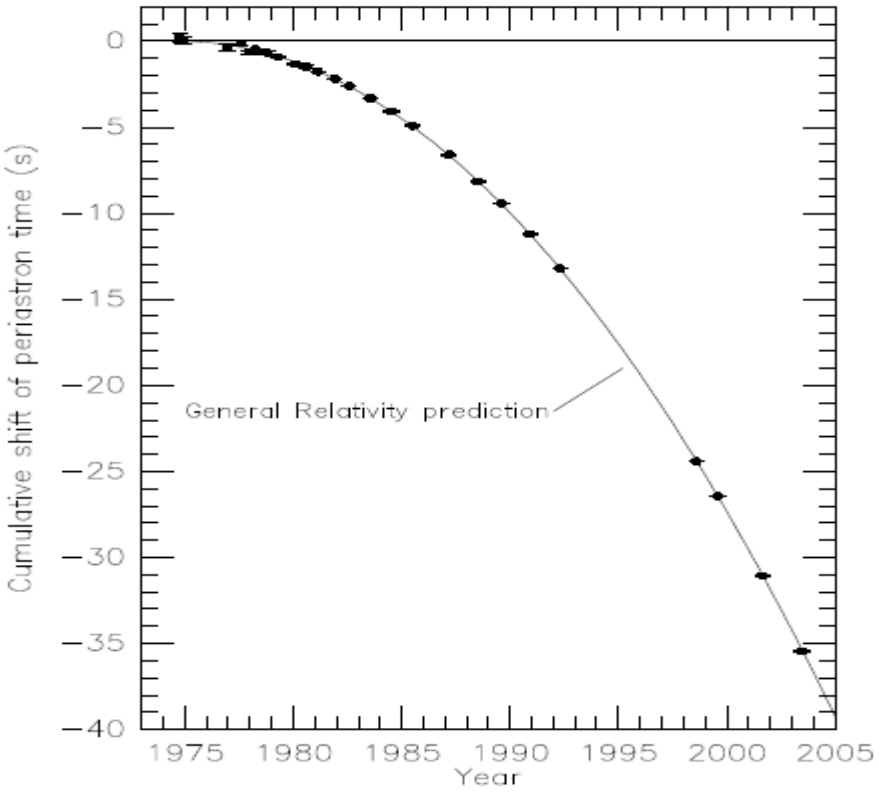
Utilizando el radiotelescopio Arecibo de 305m de diámetro (Cornell University, Puerto Rico) detectaron pulsos de radio, llegando a la conclusión de que provenían de un pulsar rotando rápidamente. La estrella de neutrones giraba 17 veces por segundo, esto es, se detectaban pulsos de radio cada 59 milisegundos.

Después de percatarse de esto, se dieron cuenta que había un cambio sistemático en el tiempo de llegada de los pulsos, a veces llegaban antes de lo esperado y otras más

tarde. Estas variaciones se producían de forma suave y repetitiva, con una periodo de 7.75 horas. Se dieron cuenta de que este comportamiento se podía describir si el pulsar formaba parte de un sistema binario junto con otra estrella.

Utilizaron la llegada de los pulsos como un "reloj" para estudiar cambios en la medición de tiempos provocados por efectos gravitatorios. Por ejemplo, cuando las dos estrellas están es su punto más cercano el campo gravitatorio es mayor, y por lo tanto el tiempo propio de éstas es menor.

En lo que se refiere a la radiación, en 1983 Taylor y sus colaboradores detectaron que había cierto cambio sistemático en la medición del tiempo de paso por el periastro relativo a si la distancia orbital se mantuviera constante en el tiempo.



Este cambio en la distancia se debe a que el púlsar está perdiendo energía. Esta pérdida de energía es la que encaja perfectamente si la asociamos a la energía que se emite con las ondas gravitacionales (ver curva teórica en la foto).

7. INTENTOS DE DETECCIÓN DIRECTA DE ONDAS GRAVITACIONALES

El primer intento de detección directa de ondas gravitacionales está fechado en 1957. Joseph Weber construyó un "detector" de ondas gravitacionales. Era una barra cilíndrica de aluminio de dos metros de longitud y metro y medio de diámetro.

La idea era la siguiente: cualquier sólido tiene una frecuencia natural de oscilación, que depende, para estos propósitos, esencialmente de su tamaño. Si una onda gravitacional con la misma frecuencia de vibración del cilindro llegara a pasar a través de éste, el cilindro vibraría con una amplitud relativamente grande. Weber esperaba poder detectar estas vibraciones.

Una de las grandes limitaciones de este método de detección de ondas gravitacionales es que es muy difícil eliminar el "ruido", es decir, las vibraciones que se

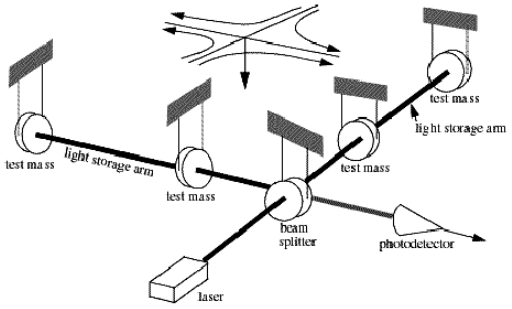
generan a nuestro alrededor y que nada tienen que ver con ondas gravitacionales. Por otro lado, no se sabía con certeza de qué orden serían las frecuencias de las ondas gravitacionales, por lo que en vez de usar un solo cilindro, se tenían que usar varios cilindros de distintos tamaños, esperando que la frecuencia natural de alguno coincidiese con la frecuencia a la que llegaran las ondas gravitacionales.

Poco tiempo después de haber empezado su búsqueda, Weber reportó que había detectado ondas gravitacionales. Esto hizo que un número mucho más grande de científicos se concentraran en la tarea de la detección de ondas gravitacionales. Ninguno pudo confirmar los resultados de Weber, y ahora creemos que las señales que recibió se debían probablemente al ruido de fondo. Sin embargo, ya la atención estaba fija en la detección de ondas gravitacionales alrededor del mundo.

En 1962 dos rusos, Mikhail Gertsenshtein y V.I. Pustovoit idearon un nuevo método de detección: detectores interferométricos de ondas gravitacionales.

Actualmente, los intentos de detección de ondas gravitacionales se basan en técnicas de interferometría láser. En estos laboratorios actuales se tiene un interferómetro (generalmente tipo Michelson) en cuyos brazos, que son kilométricos, se realiza un alto grado de vacío. En los extremos de cada brazo hay una masa con elementos reflectores. El movimiento de alguna masa provocaría que el patrón de interferencia cambie. Esto es lo que se quiere detectar, ya que si llega una onda a las masas provocaría una pequeña deformación.

Esquema de un interferómetro de Michelson:



Citamos algunos de los centros y proyectos para la detección de ondas gravitacionales.

- LIGO (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory)

Está formado por dos interferómetros de Michelson, uno en Hanford (Washington) y otro en Livingston (Louisiana). Operado por Caltech y MIT.

- VIRGO

También es un interferómetro tipo Michelson, consta de dos brazos (perpendiculares) de 3 km. Está situado en Cascina, cerca de Pisa.

- GEO600

Es un laboratorio alemán-británico situado en Sarstedt, Alemania. Consta de dos brazos de 600 m. Como curiosidad, decir que el grado de vacío es tan grande que la presión en el interior de los brazos es menor que 10e-11 bar.

- LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

Es un proyecto muy ambicioso llevado a cabo por la NASA en el que se pretende mandar un interferómetro láser al espacio (2020?) formado por tres plataformas que orbitarán a 1 UA de distancia del Sol, formando un triángulo equilátero de 5e+9 m de lado. La idea es que la longitud de los brazos del interferómetrono sea gigantesca en comparación a los actuales y además no sufra las vibraciones terrestres (que sí sufren los vistos anteriormente). Las masas test serán cubos de 4.6 cm de lado formados por una aleación de platino-oro, de 2 kg, que servirán de puntos de referencia para la toma de medidas de distancias.

8. CONCLUSIONES

Las ecuaciones de campo de Einstein predicen la existencia de ondas gravitacionales. La relativa debilidad de este tipo de radiación ha resultado en la imposibilidad de detectarlas con tecnología pasada.

Observaciones de pulsares binarios en los que la separación orbital decrece como función del tiempo han sido indicativas de la existencia real de ondas gravitacionales, las cuales son responsables de extraer energía al sistema binario.

Existen muchos proyectos diseñados con el propósito de detectar ondas gravitacionales, la mayoría de los cuales utilizan el método de interferometría Michelson para detectar el paso de ondas gravitacionales. Estos proyectos están en planificación o en tempranas etapas de construcción y operación, y cuando estén en funcionamiento prometen obtener resultados altamente importantes para nuestro conocimiento del universo.

La detección directa de ondas gravitacionales traería como consecuencia una nueva era en astrofísica y cosmología. Tendríamos una nueva forma de obtener información sobre el cosmos.

REFERENCIAS

- Hartle J. Gravity. An introduction to Einstein's General Relativity. 2003. Pearson Education.
- Misner C. et al. Gravitation. 1973. W.H. Freeman and Company.
- Woodhouse N.M.J. General Relativity. 2007. Springer.
- URL: http://www.astro.cornell.edu/academics/courses/astro2201/psr1913.htm
- URL:http://www.astro.cornell.edu/academics/courses/astro2201/kepler_binary.htm
- URL: http://www.naic.edu/
- URL: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/hulse-lecture.pdf
- URL: http://www.ligo.caltech.edu/
- URL: http://www.virgo.infn.it/
- URL: http://www.geo600.org/
- URL: http://lisa.nasa.gov/