

Ondas gravitacionales:

Un nuevo contacto de la física con la tecnología

Hugo García Compeán

Cinvestav, Unidad Monterrey, Departamento de Física, Cinvestav IPN
compean@fis.cinvestav.mx

J. Rubén Morones Ibarra

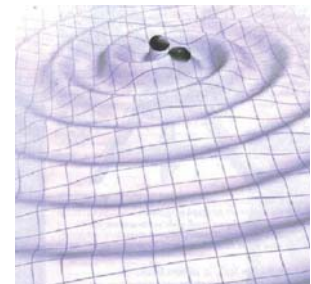
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, UANL
rmorones@fcfm.uanl.mx

Leonel Toledo Sesma

Escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN
leonelesfm@yahoo.com.mx

RESUMEN

La teoría de Einstein del campo gravitacional conocida como Relatividad General predice la existencia de ondas gravitacionales. A pesar de todos los esfuerzos, hasta ahora se ha fracasado en todo intento de detección de dichas ondas, de tal manera que el análogo del experimento de Hertz para la detección de ondas electromagnéticas está en prospectiva. Aquí describiremos qué son las ondas gravitacionales y esquematizaremos algunos de los intentos pasados, presentes y futuros para su observación.



PALABRAS CLAVE

Ondas gravitacionales, relatividad general, interferometría, sistemas de telecomunicaciones.

ABSTRACT

Gravitational waves are predicted by Einstein's theory of Relativity which is known as General Relativity. In spite of all experimental attempts to detect those waves, up to the present day, this has not been possible. Then the implementation of the analogue to the Hertz experiment still remains in prospective. In the present paper we describe what gravitational waves are, and also we discuss some of the past, current and future experiments to detect gravitational waves

KEYWORDS

Gravitational waves, general relativity, interferometry, communication systems.

INTRODUCCIÓN

Una de las teorías más firmemente establecidas en la física clásica es la teoría electromagnética o electromagnetismo. Esta estructura teórica se ha debido a la culminación de los trabajos de muchos científicos durante los siglos XVIII y XIX, entre los que destacan: J.M. Ampere, C.A. Coulomb, M. Faraday, F. Gauss, J.C. Maxwell y H.C. Oersted (para una revisión del electromagnetismo con implicaciones a la tecnología ver.!) Los inicios de esta teoría se encuentran en el estudio de los fenómenos eléctricos que se remontan a la época de los griegos, cuando Tales de Mileto, hacia el año 600 AC, observó que la piedra

de ámbar al frotarse con un trozo de piel tenía la propiedad de atraer objetos como plumas de ave. Coulomb realizó experimentos con esferas cargadas y encontró la primera ley de las cargas eléctricas, la ley que lleva su nombre y que establece que las cargas del mismo signo se repelen y las de signos opuestos se atraen. La magnitud de esta fuerza es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación entre ellas.

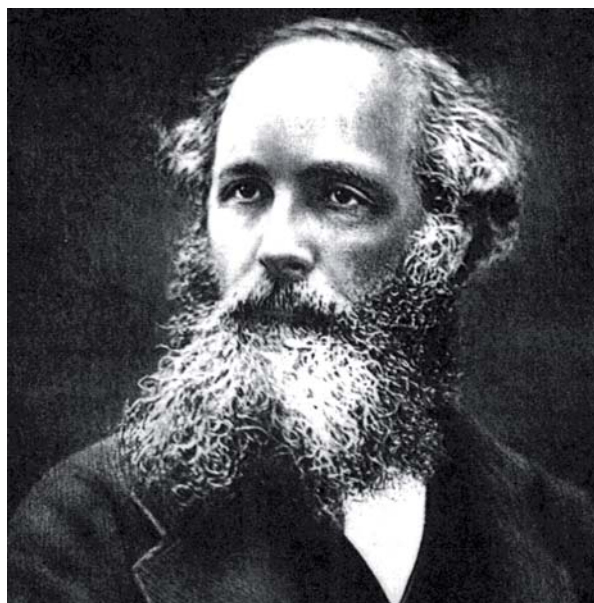
Por otra parte, el descubrimiento del magnetismo tiene asociada una bonita leyenda que relata que un pastor notó que su bastón, el cual tenía una punta de hierro, era atraído por unas piedras negras en una región cercana a la ciudad de Magnesia, en lo que hoy es Turquía. Podemos imaginar el asombro de este pastor al sentir esta fuerza misteriosa. El origen del nombre magnetismo se debe justamente a la ciudad de Magnesia. El magnetismo fue estudiado en forma independiente de los fenómenos eléctricos pues no se les consideraba relacionados.

Cuando se tuvo la posibilidad de tener un dispositivo que produjera una corriente eléctrica continua se presentaron las condiciones para que se estudiaran las relaciones entre corrientes eléctricas e imanes. En el año 1820 el físico H.C. Oersted observó que una corriente eléctrica que pasa por un alambre producía la desviación de la aguja magnética de una brújula. Este fue el inicio del estudio de la relación entre la electricidad y el magnetismo. La formulación teórica de la relación entre la electricidad y el magnetismo la completó James Clerk Maxwell, durante la segunda parte del siglo XIX, en una teoría unificada, mediante cuatro ecuaciones que hoy conocemos como las ecuaciones de Maxwell y que conforman la teoría electromagnética.

La teoría electromagnética representa uno de los logros más notables en la historia de la física. Las ecuaciones de Maxwell son suficientes para describir todos los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos. Estas cuatro ecuaciones conducen a la notable predicción de que es posible producir ondas de una naturaleza no mecánica, las ondas electromagnéticas, de las cuales la luz visible es un caso particular. Las leyes del electromagnetismo no son compatibles con las leyes mecánicas del movimiento, lo cual sirvió de inspiración a Einstein y Lorentz para el establecimiento de

la teoría especial de la relatividad.^{2,3} Las leyes electromagnéticas parecían privilegiar un sistema de referencia particular con respecto al cual las ondas electromagnéticas se propagarían. Este sistema se asoció con la existencia del “éter luminífero” un “algo” completamente desconocido que permeaba todo el espacio. Contrariamente, la mecánica de Newton está basada en el principio de relatividad de Galileo, que afirmaba que las leyes de la mecánica son las mismas para diferentes observadores moviéndose con una velocidad relativa uniforme. Observaciones de A. A. Michelson y E. Morley, a finales del siglo XIX, confirmaron la inexistencia de dicho “éter”. La resolución de esta paradoja fue dada finalmente por Einstein en 1905 al afirmar que, al igual que las leyes de la mecánica, la teoría de Maxwell debe de satisfacer una especie de principio de Galileo llamado, más generalmente, principio de la relatividad especial. La compatibilidad con la mecánica se manifiesta mediante la generalización de los conceptos de espacio y tiempo, así como los de masa y energía.

Las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz y las fuentes de estas ondas son las cargas eléctricas aceleradas. La confirmación experimental de la existencia de ondas electromagnéticas la realizó el físico H. Hertz en el año 1888 en un famoso y sorprendente experimento realizado en Alemania. El experimento



James Clerk Maxwell, 1831-1909, físico inglés que formuló la teoría electromagnética.



Heinrich Hertz, 1857-1894. Ingeniero alemán que se dedicó al estudio de la física y descubrió las ondas electromagnéticas predichas por la teoría de Maxwell

de Hertz consistió en colocar un dispositivo con una pila eléctrica, una bobina y un condensador el cual, formando un circuito, lo abría y lo cerraba. Esto produjo que en otro circuito similar, pero sin batería, colocado en otro lugar del laboratorio, a una distancia de aproximadamente cinco metros se produjera una chispa entre dos alambres separados escasos milímetros. El éxito de este experimento ponía en evidencia que el primer circuito al abrirse y cerrarse generaba una onda electromagnética que posteriormente era captada en el segundo circuito, desconectado eléctricamente del primero. El equipo utilizado para generar y recibir ondas electromagnéticas se conoce como oscilador electromagnético. En su forma más elemental y primitiva este equipo consiste en una fuente de corriente, un condensador eléctrico y una bobina.

La primera aplicación práctica de este fenómeno la realizó el ingeniero italiano Guillermo Marconi en el año 1899 al transmitir información por radio a



Guillermo Marconi, 1884-1937, físico italiano que realizó la primera transmisión inalámbrica en el año de 1899. En 1909 se le concedió el Premio Nóbel de física por sus trabajos de comunicación por radio.

través del Canal de la Mancha por una distancia de 14.5 km. y posteriormente al realizar la comunicación por radio entre Poldhu (en la costa de Inglaterra) y Terranova en Canadá en 1901. Este fue el inicio de las comunicaciones modernas las cuales han logrado un desarrollo sorprendente con la radio, teléfonos, la televisión, los celulares, la Internet, etc.

En este artículo describiremos las analogías y diferencias entre las ondas electromagnéticas y las ondas gravitacionales. Mencionaremos las grandes similitudes que permitieron el avance sustancial en la física del siglo XX como la mecánica cuántica y enfatizaremos las diferencias sutiles entre ambos tipos de ondas las cuales justamente permitirán ver a las ondas gravitacionales como una ventana para conocer fenómenos nuevos en nuestro universo y ver regiones del espacio-tiempo todavía inexploradas. Primero para beneficio de los lectores que no estén familiarizados con la física del electromagnetismo, comenzaremos dando un breve repaso de los conceptos básicos. Pedimos disculpas por no resistir la tentación de introducir algunos detalles matemáticos. Sin embargo, el lector puede omitir dichos detalles sin una pérdida sustancial del contenido del artículo. Salvo los detalles técnicos, nos mantendremos en un nivel elemental con la esperanza de que las ideas sean accesibles para los estudiantes de ciencias e ingeniería y profesionales de otros campos del conocimiento.

CONCEPTOS BÁSICOS DEL ELECTROMAGNETISMO Y ALGUNAS APLICACIONES

Fundamentos teóricos

El concepto de onda en física es el de una perturbación que se propaga a través del espacio. El ejemplo más elemental es el de una onda en el agua; si en el agua tranquila de un estanque dejamos caer una piedra, causamos una perturbación en su superficie que observamos que se propaga en círculos concéntricos que parten del punto donde cayó la piedra. Esta perturbación, lo mismo que una onda generada en una cuerda tensa, sujeta por un extremo, cuando movemos el extremo libre hacia arriba y hacia abajo generando ondas, tiene una descripción matemática muy general mediante una ecuación conocida como ecuación de onda.

Una perturbación que se propaga en una sola dirección, como una onda en una cuerda propagándose en la dirección x , se puede representar matemáticamente como una función $f(x,t)$ donde f es el desplazamiento de la cuerda respecto a la posición de equilibrio del punto x sobre la cuerda y t es el tiempo en el cual ocurre el desplazamiento. La función $f(x,t)$ satisface entonces la ecuación

diferencial: $\frac{\partial^2 f(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f(x,t)}{\partial t^2}$, en donde v es la velocidad de propagación de la onda. La ecuación de onda tridimensional para una perturbación que se propaga en el espacio está dada por

$$\nabla^2 f(x,y,z,t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f(x,y,z,t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

en donde $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ es el operador

Laplaciano en coordenadas cartesianas en tres dimensiones. Toda perturbación descrita por la función $f(x,y,z,t)$ que satisface la ecuación (1) decimos que es la amplitud de una onda que se propaga en el espacio con velocidad v .

Una de las grandes ideas desarrolladas en la física es el concepto de campo. El concepto de campo fue propuesto originalmente por Faraday (y puesto en su forma actual por Maxwell) para explicar la forma en la que interactúan las cargas eléctricas, pero la idea de campo se ha generalizado a todas las fuerzas conocidas en la actualidad. Para ilustrar la idea de campo utilizamos el ejemplo de la fuerza eléctrica entre un par de partículas cargadas y decimos que alrededor de una carga eléctrica existe algo que produce un efecto de una fuerza cuando otra carga eléctrica de prueba se coloca en ese punto; este algo es el campo y tiene una descripción matemática muy precisa, es una función que depende de la posición y del tiempo, tal que al multiplicarla por la carga eléctrica nos da una fuerza que esa carga siente en el punto donde se coloca, lo cual da la noción de campo vectorial.

En este contexto, las ecuaciones de Maxwell son un conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales que describen la dinámica de los campos eléctrico y magnético y predicen la propagación de ellos en forma de ondas. Establece una relación precisa entre

las intensidades de dichos campos y los valores de las fuentes de campo eléctrico (densidades de carga eléctrica) y de campo magnético (densidades de corrientes).

Las ecuaciones de Maxwell, para el vacío, se pueden escribir como:⁴

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (5)$$

donde \vec{E} y \vec{B} representan los vectores de campo eléctrico y magnético, respectivamente, los cuales son producidos por las fuentes de carga, con densidad ρ y la fuente de corriente de densidad \vec{J} . En general, las variables \vec{E} , \vec{B} , ρ y \vec{J} son funciones de las coordenadas espaciales y el tiempo, mientras que los parámetros ϵ_0 y μ_0 son constantes. Una consecuencia de las ecuaciones de Maxwell es el descubrimiento de que la luz es de naturaleza electromagnética y su velocidad puede ser determinada en términos de variables puramente electromagnéticas, teniendo el enorme valor .

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Las ecuaciones de onda para los campos están dadas por:

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad (6)$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}, \quad (7)$$

lo cual indica que tanto el campo eléctrico como el magnético se propagan con la velocidad de la luz, constituyendo estos campos la onda electromagnética.

Dadas las distribuciones de carga eléctrica y de corriente dependientes del tiempo y una geometría en la cual las cargas se pueden mover, las ecuaciones de Maxwell pueden ser utilizadas para obtener los campos electromagnéticos \vec{E} y \vec{B} a diferentes distancias r y tiempos t de las fuentes, que son

emitidos en forma de radiación. De particular interés es el cálculo de dicha radiación en puntos muy lejanos de las fuentes (zona de radiación). En esta zona la contribución dominante, para los campos eléctrico y magnético, viene dada por la contribución monopolar (varía con el inverso de la distancia r) y dipolar (varía con el cubo del inverso de la distancia). La próxima sería la contribución cuádrupolar, la cual varía con el inverso de la quinta potencia de la distancia. El término dipolar viene especificado por el vector de momento dipolar. Mientras que la potencia total radiada en la zona de radiación está dominada por el término dipolar.

$$P = \frac{k^4}{12\pi} |\vec{p}|^2 \quad (8)$$

Así, en una antena electromagnética, la radiación dominante viene de la contribución dipolar. Configuraciones más complicadas dan lugar al cuádruplo eléctrico cuya potencia total radiada es de la forma:

$$P = \frac{1}{4\pi} \frac{k^4}{360} \sum_{i,j} |Q_{ij}|^2, \quad (9)$$

en donde Q_{ij} es el tensor de momento cuádrupolar. Más adelante veremos que para el caso gravitacional la contribución a más bajo orden no es la dipolar sino la cuádrupolar.

Electromagnetismo y las comunicaciones

Ya hemos mencionado la forma asombrosa en la que Marconi logró la transmisión de información a través del canal de la Mancha y también a través del Atlántico sin el uso de alambres. El avance fue enorme al permitir que ahora ya no sea necesario establecer una red eléctrica alámbrica para enviar información, disminuyendo de paso los costos. Además de la increíble ventaja de que la información se transmitirá a la velocidad de la luz c .

La tecnología de las telecomunicaciones consiste fundamentalmente en desarrollar equipos para producir y procesar señales acústicas, ópticas, eléctricas y magnéticas que lleven la información que se requiere y transmitir las al espacio como ondas electromagnéticas mediante las antenas transmisoras y que equipos receptores de radio, televisión, teléfonos celulares, etc., reciban esta información.

La manera en la que se realiza eso, es mediante el procesamiento de la señal de la información para realizar la modulación de una señal eléctrica de muy alta frecuencia, conocida como la señal portadora. Con esto la señal de información que se desea transmitir se transfiere a una señal de alta frecuencia que es más manejable eléctricamente. La señal se puede procesar de manera conveniente, tal que se puede llevar a una antena transmisora en donde la naturaleza eléctrica de la señal de información de alta frecuencia, se convierte en radiación electromagnética, la cual se propaga en el espacio con cierta cobertura en espacio y en frecuencia (patrón de radiación), dependiendo de la potencia de radiación y del ancho de banda de la emisión. La señal es recibida por un dispositivo diseñado para demodularla de tal manera que en el proceso, la señal portadora de alta frecuencia es separada de la señal de información. Dicha señal es finalmente amplificada y utilizada de acuerdo al propósito del mensaje (para una revisión elemental de la teoría de procesamiento de señales y de las telecomunicaciones ver referencia ⁵).

ONDAS GRAVITACIONALES: ¿QUÉ SON?

Relatividad general y las ondas gravitacionales

La teoría de la gravitación universal desarrollada por Newton lleva implícita una característica que se conoce como acción a distancia, lo cual indica que la interacción se propaga instantáneamente a todo el espacio. Esto quiere decir que si una estrella a millones de años luz de distancia de la tierra cambia de posición, entonces la tierra se enteraría instantáneamente de este cambio modificando la fuerza que debe sentir con la nueva posición de la estrella.

La ley de Newton de la gravitación universal para la magnitud de la fuerza gravitacional F ejercida por una masa sobre otra puede escribirse de la siguiente manera

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (10)$$

en donde G es la constante de gravitación universal de Newton.

La ecuación (10) establece que la fuerza sentida por el cuerpo de masa m_1 debida al cuerpo de masa m_2 en un instante determinado depende de la distancia r en ese mismo instante. Dicha expresión tiene gran parecido a la ley de Coulomb para la fuerza electrostática entre dos cargas eléctricas, si en vez de cargas eléctricas sustituimos masas gravitacionales. Una gran diferencia sin embargo es que mientras las cargas eléctricas vienen en dos tipos, positivas y negativas que producen tanto fuerzas atractivas como repulsivas, la masa gravitacional viene en un solo tipo tal que únicamente produce fuerzas atractivas.

Si definimos un potencial gravitacional $V(\vec{r})$ en un punto \vec{r} , debido a una masa m colocada en el origen, mediante la relación

$$V(\vec{r}) = -G \frac{m}{r}, \quad (11)$$

Donde el signo negativo indica la naturaleza atractiva de la fuerza gravitacional, encontramos que para los puntos del espacio donde no hay una distribución de materia, $V(\vec{r})$ satisface la ecuación de Laplace

$$\nabla^2 V(\vec{r}) = 0. \quad (12)$$

La ecuación 12 puede considerarse como el caso límite de una ecuación de onda (1) cuando la velocidad v tiende a infinito. La incorporación de materia descrita por una densidad de masa $\rho(\vec{r})$ nos lleva a la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 V(\vec{r}) = 4\pi\rho(\vec{r}). \quad (13)$$

En forma similar al caso de la ley de Coulomb, la ecuación 10, tiene validez sólo para el caso estático, pues de otra manera, implicaría la propagación instantánea de las señales gravitacionales, un resultado incompatible con la teoría de la relatividad especial que tiene como uno de sus resultados que ninguna señal se propague a mayor velocidad que la de la luz.

Dado el antecedente de lo que Maxwell había logrado en el electromagnetismo, Einstein intentaba algo similar para la gravitación, buscando una descripción del campo gravitacional compatible con la relatividad especial. Es posible que Einstein haya seguido una línea de razonamiento similar a la que siguió Maxwell para generalizar la ley de Coulomb

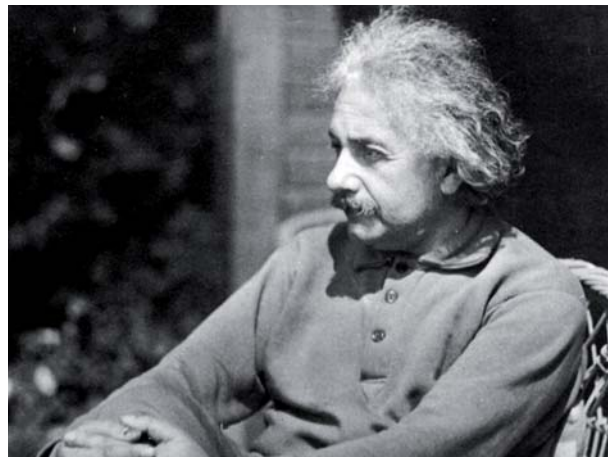
y desarrollar su teoría del campo electromagnético, pero se encontró, tal vez, con ciertas dificultades que lo llevaron a buscar otro camino.

La forma como Einstein desarrolló la teoría general de la relatividad fue a través de una idea notable, la de considerar a la fuerza gravitacional como una manifestación de la curvatura del espacio-tiempo (ver, por ejemplo, referencia⁶). Esta formulación permite describir, por ejemplo, el movimiento de un planeta alrededor del Sol, no a través de la fuerza que el Sol ejerce sobre el planeta, sino porque sigue una trayectoria a la que lo obliga la geometría curva del espacio-tiempo, una trayectoria conocida como geodésica.

La teoría relativista de la gravitación de Einstein es conocida como la *teoría general de la relatividad*. Las ecuaciones de Einstein describen la dinámica del campo gravitacional, corresponden con una generalización de la ecuación de Poisson (13) y se escriben como.⁶

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}, \quad (14)$$

donde $G_{\mu\nu}$ se conoce como el tensor de Einstein. Aquí $R_{\mu\nu}$ es el tensor de Ricci, $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$ es la curvatura escalar, $g_{\mu\nu}$ es el tensor métrico y $T_{\mu\nu}$ es el tensor de energía-momento del campo gravitacional (análogo a la densidad de masa). Los objetos tensoriales de dos índices son un poco más complicados que los objetos vectoriales de un solo índice, sin embargo basta saber que el tensor de



Albert Einstein, 1879-1955, físico alemán que desarrolló la teoría de la relatividad.

Einstein juega el papel del operador Laplaciano de la ecuación de Poisson. Finalmente la métrica $g_{\mu\nu}$ juega el papel del potencial escalar gravitacional V , en este caso tenemos 10 potenciales dado que la métrica viene descrita por una matriz simétrica 4×4 .

El tensor métrico $g_{\mu\nu}$ describe la geometría del espacio-tiempo y depende de la distribución de masa y energía. Las cantidades $R_{\mu\nu}$, R y $T_{\mu\nu}$ dependen finalmente de $g_{\mu\nu}$.

Para el espacio vacío $T_{\mu\nu} = 0$, así que las ecuaciones (14) se reducen a

$$R_{\mu\nu} = 0 \quad (15)$$

la cual es la forma de las ecuaciones de Einstein del campo gravitacional en el vacío. Poco después de su formulación, la teoría de Einstein fue corroborada experimentalmente en 1919 durante un eclipse total de sol al hacer mediciones de la desviación de la luz al pasar por el campo gravitacional del sol. Las mediciones coincidían con las predicciones de la relatividad general. Posteriormente se añadieron brillantemente dos nuevas pruebas como la medición del corrimiento en el perihelio del planeta Mercurio y el corrimiento al rojo del efecto Doppler. Hoy en día la teoría de gravitación de Einstein, junto con la mecánica cuántica, es considerada como uno de los pilares de la física del siglo XX.

Debido a que las ecuaciones de Einstein (14) y (15), son 10 ecuaciones diferenciales no lineales, resulta muy complicado un tratamiento exacto para estudiar la búsqueda de soluciones. Aún así, los físicos y matemáticos no se han intimidado y han encontrado un conjunto de soluciones exactas que describen una lista de posibles objetos compactos astrofísicos como los pulsares y los hoyos negros, caracterizándolos por un número finito de parámetros físicos como: la masa M , la carga eléctrica Q , el momento angular J , etc.

Otra posibilidad en la búsqueda de soluciones y para establecer contacto con la teoría de Newton de la gravitación, es el uso de métodos aproximados considerando campos gravitacionales débiles. Esto se logra si se propone un campo gravitacional descrito por una métrica $g_{\mu\nu}$ que se aparte poco de la métrica del espacio plano de Minkowski $\eta_{\mu\nu}$, lo que escribimos como

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad (16)$$

siendo $h_{\mu\nu}$ una pequeña perturbación (o fluctuación de la métrica con respecto a la métrica del espacio plano) de la métrica de Minkowski, $|h_{\mu\nu}| \ll 1$. Manteniendo solo términos de primer orden en $h_{\mu\nu}$, es posible probar que la perturbación $h_{\mu\nu}$, satisface la ecuación de onda descrita por la ecuación (1),

$$\nabla^2 h_{\mu\nu} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 h_{\mu\nu}}{\partial t^2} \quad (17)$$

Esta es justamente otra similitud con la teoría electromagnética cuyos campos satisfacen las ecuaciones de onda (ver ecuaciones (6) y (7)), sin embargo se debe recordar que hemos perdido información al linealizar, es decir, tomar la aproximación (17). Las soluciones de la ecuación (17) son de la forma.

$$h_{\mu\nu} = C_{\mu\nu} e^{ik_\sigma x^\sigma} \quad (18)$$

Esta solución se conoce como una onda gravitacional plana y representa la propagación ondulatoria (u oscilatoria) de la perturbación $h_{\mu\nu}$ en el espacio de fondo de Minkowski, (ver figura 1). Es fácil ver que la condición de que $h_{\mu\nu}$ sea solución de (17) implica que el cuádrivector (o tetravector) de propagación k_μ es de tipo luz, es decir, $k_\sigma k^\sigma = 0$, y por lo tanto la velocidad de propagación de la onda gravitacional será la velocidad de la luz c .

Las simetrías remanentes de las ecuaciones de Einstein implican que de las 10 componentes independientes originales, sólo 2 de ellas son independientes, teniendo entonces la onda gravitacional $h_{\mu\nu}$ sólo 2 grados de libertad transversos a la dirección de propagación que designaremos como C_+ y C_\times . Dichas componentes independientes se designan normalmente por $h^{TT}_{\mu\nu}$.^{6,7,8,9}

La descripción de la interacción entre la onda gravitacional y la materia se realiza mediante la llamada ecuación de desviación geodésica.

$$\frac{D^2}{D\tau^2} S^\mu = R^\mu_{\nu\rho\sigma} U^\nu U^\rho S^\sigma \quad (19)$$

Supongamos que dos partículas de cierta masa y de velocidad U_μ se propagan siguiendo trayectorias

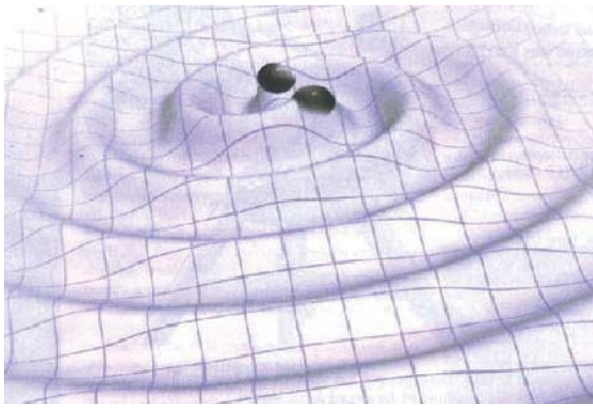


Fig.1. La figura muestra dos cuerpos masivos (puntos negros) que pudieran representar dos estrellas (o dos hoyos negros) girando alrededor de su centro de masa y sujetos a una fuerte interacción gravitacional. El movimiento brusco de grandes cantidades de masa y energía, producirán ondulaciones de la distancia (métrica) de cualquier par de puntos del espacio-tiempo. Dichas oscilaciones se alejarán de la fuente a la velocidad de la luz.

geodésicas. Ante la interacción con el campo gravitacional dichas partículas se pueden acercar o ir separando una cierta cantidad S^μ que satisface dicha ecuación (19). Soluciones de esta ecuación con $C_+ \neq 0$ y $C_\times = 0$ están dadas por

$$S^1 = S^1(0) + \frac{1}{2} C_+ e^{ik_\sigma x^\sigma} S^2(0),$$

$$S^2 = S^2(0) + \frac{1}{2} C_+ e^{ik_\sigma x^\sigma} S^1(0) \quad (20)$$

y para $C_+ = 0$ y $C_\times \neq 0$

$$S^1 = S^1(0) + \frac{1}{2} C_\times e^{ik_\sigma x^\sigma} S^2(0),$$

$$S^2 = S^2(0) + \frac{1}{2} C_\times e^{ik_\sigma x^\sigma} S^1(0). \quad (21)$$

Así, la onda está polarizada de tal forma que oscila en el plano perpendicular a su propagación expandiéndose en una dirección (modo C_+) y posteriormente expandiéndose en la dirección perpendicular dentro del plano perpendicular a la dirección de propagación (modo C_\times) (ver figura 2). Por lo tanto, C_+ y C_\times miden los dos modos independientes de polarización lineal de la onda gravitacional. Esto es sumamente

importante para el diseño de antenas gravitacionales como veremos más adelante.

En resumen, la onda gravitacional se puede describir como una distorsión del espacio $h(t)$ variando en el tiempo, lo que significa una deformación de la geometría del espacio-tiempo, es decir, a su paso modifica la distancia efectiva L entre cualquier par de puntos (ΔL) y esta modificación va cambiando con el tiempo. Las ondas son producidas por movimientos bruscos de grandes cantidades de materia a muy altas velocidades (velocidades relativistas) y se producirá como un pulso corto si el movimiento es brusco, la onda también puede ser producida periódicamente si el movimiento de la materia es periódico y la onda tendrá la misma frecuencia de la fuente.

Para el caso de una onda gravitacional, se sigue un procedimiento muy similar al caso electromagnético, si se desea obtener la energía total radiada. En esta situación se deben considerar la presencia de fuentes y las ecuaciones de Einstein en el vacío (15), ya no son suficientes y más bien se debe considerar la linealización de las ecuaciones completas (14). Una gran diferencia es que en este caso la contribución a la energía de radiación no trivial a orden más bajo viene del cuádrupolo gravitacional, es decir, que la radiación dominante es cuádrupolar y no hay término

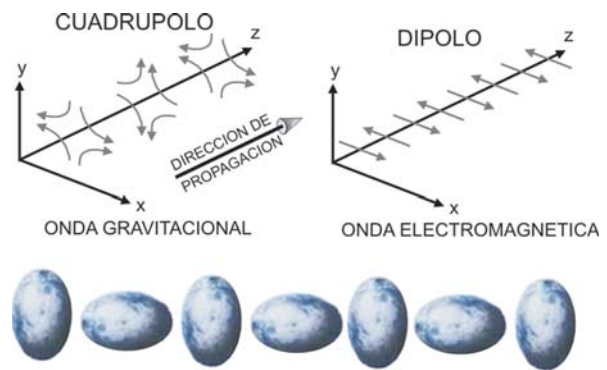


Fig. 2. La figura muestra la diferencia esencial entre una antena electromagnética y una gravitacional. La principal contribución de una antena gravitacional será cuádrupolar, mientras que la de la electromagnética será dipolar. La polarización lineal de la onda gravitacional de la radiación cuádrupolar consiste de dos modos de oscilación que expanden (o contraen) la distancia entre dos puntos en direcciones perpendiculares entre sí. Estas direcciones forman un plano, el cual es también perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

dipolar. La potencia total radiada está dada por:

$$P = \frac{G}{45} \left[\frac{d^3}{dt^3} Q_{ij} \frac{d^3}{dt^3} Q^{ij} \right], \quad (22)$$

en donde Q_{ij} es la parte sin traza del tensor de momento cuádrupolar.

La pregunta ahora es: ¿cómo detectar estas ondas gravitacionales cuádrupolares que se manifiestan como ondulaciones del espacio-tiempo ocasionadas por cambios violentos en la distribución de masa en alguna región del espacio?. Estas ondas se propagan de una manera semejante a las ondas electromagnéticas. Antes de discutir los métodos de detección vamos a explicar cómo un sistema binario de estrellas podría radiar ondas gravitacionales.

Ondas gravitacionales generadas por un pulsar binario

Una antena gravitacional es normalmente un proceso astrofísico extremo en el cual se generan y radian ondas gravitacionales. La causa pudiera ser una explosión de supernova, la colisión de 2 estrellas de neutrones, la colisión de 2 hoyos negros, el propio Big Bang o algún otro cataclismo cósmico. A diferencia del caso electromagnético, en donde un arreglo metálico que conforma la antena puede servir tanto para la emisión como para la recepción de señales, para el caso gravitacional donde las ondas son generadas en procesos astrofísicos violentos, donde intervienen objetos exóticos, no es posible utilizar todavía dichos objetos para su detección. Por tal motivo, los dispositivos diseñados para la observación de ondas gravitacionales, también conocidos como antenas gravitacionales receptoras, son muy difíciles de implementar ya que la señal en la mayoría de los casos es muy débil ($h(t)$ es el orden de 10^{-21}).

Afortunadamente existe un caso en el cual se puede obtener una fuerte *evidencia* de la existencia de radiación gravitacional de forma indirecta. Este es el caso de la variación del periodo de rotación de un sistema binario de estrellas de la misma masa M (una de ellas siendo un pulsar) debido a la emisión de ondas gravitacionales, (ver figura 3). El pulsar es una fuente de señales periódicas de ondas de radio que se observan en radiotelescopios en la tierra, las cuales

se dan mediante periodos de tiempo muy cortos que coinciden con el periodo de rotación del pulsar.

La potencia total radiada por el sistema binario está dada por

$$P = \frac{2^7}{5} G M^2 r^4 \Omega^6, \quad (23)$$

en donde $\Omega = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{GM}{4r^3}}$ es la frecuencia angular.

O bien mediante

$$P = \frac{2}{5} G^4 \frac{M^5}{r^5}. \quad (24)$$

La dependencia $1/r^5$ en esta última expresión es otra señal de que la principal contribución a la potencia radiada de una antena gravitacional es de tipo cuádrupolar.

En los años 70's estos cálculos fueron contrastados con observaciones en el periodo del pulsar binario PSR1913+16. Los profesores Russell Hulse y Joseph Taylor de la Universidad de Princeton, observaron dicho pulsar por aproximadamente 8 años (1974 a 1982) en el radiotelescopio de Arecibo Puerto Rico.¹⁰ Ellos observaron un decaimiento orbital de aproximadamente 75 millonésimos de segundo-arco/año. Este decaimiento podría deberse a la pérdida por la emisión de ondas gravitacionales del pulsar binario. La comparación indicó que los cálculos

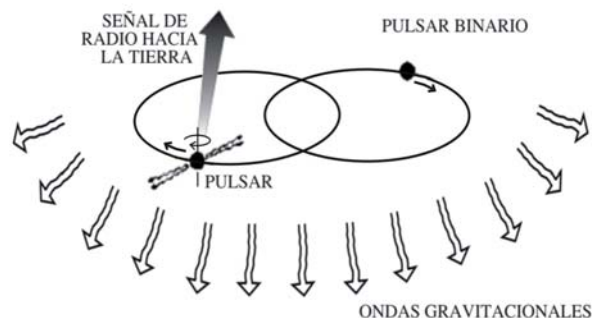


Fig. 3. El pulsar binario PSR1913+16 consiste de un sistema binario de dos estrellas, una de las cuales es un pulsar, que orbitan su centro de masa. El pulsar es una fuente periódica natural de ondas de radio. El sistema también emite radiación gravitacional lo cual se traduce en pérdidas de energía para el sistema. Dichas pérdidas se reflejan en las observaciones como una disminución de la frecuencia orbital del pulsar.

basados en la teoría de Einstein coincidieron con las observaciones de Hulse y Taylor. Esto dio por vez primera una evidencia sustancial de la existencia de las ondas gravitacionales. Por tal motivo, Hulse y Taylor obtuvieron el premio Nóbel de física en 1993.

SIMILITUDES Y DIFERENCIAS ENTRE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS Y LAS ONDAS GRAVITACIONALES

Como hemos visto hasta ahora, a pesar de que las interacciones electromagnética y gravitacional compartan similitudes, como el que ambas satisfagan una ley del cuadrado inverso, ambas son bastante diferentes. Sin embargo, mientras que las ondas electromagnéticas son oscilaciones del campo electromagnético que se propaga en el espacio-tiempo, las ondas gravitacionales son oscilaciones de la fábrica del mismo espacio-tiempo. Por un lado las ondas electromagnéticas son emitidas en forma incoherente por átomos o procesos cuánticos individuales, mientras que las ondas gravitacionales cósmicas se producen coherentemente debido al movimiento de grandes cantidades de masa-energía. También, las ondas electromagnéticas al propagarse por el medio interestelar son fácilmente absorbidas y dispersadas por la materia, las ondas gravitacionales no son dispersadas por ningún tipo de materia. El espectro de las ondas electromagnéticas comienza con frecuencias de $f = 10^7$ Hz y se extiende hacia arriba por 20 órdenes de magnitud, mientras que el espectro de ondas gravitacionales comienza en 10^4 Hz y se extiende hacia abajo por cerca de 20 órdenes de magnitud.

Estas diferencias determinan que la información que proporcionarán las ondas gravitacionales y electromagnéticas será ortogonal en el sentido de que detectarán objetos muy diferentes. Objetos astrofísicos típicos vistos a través de ondas electromagnéticas son por ejemplo: atmósferas estelares, discos de acreción y nubes de gas interestelar. Objetos típicos a ser vistos por ondas gravitacionales son: hoyos negros y colisiones entre ellos, interiores de supernovas, etc. Esto abrirá una nueva ventana de observación del universo hasta ahora desconocida por nosotros. Esto es comparable con la nueva era de la astronomía

a la que dio lugar la astronomía de ondas de radio mediante radiotelescopios en los años 40's, 50's y 60's. La radioastronomía nos trajo agradables sorpresas como el descubrimiento, por ejemplo, de los cuásares, los pulsares y la radiación térmica de fondo de microondas. Esto permitió entender mucho mejor el universo en el cual vivimos.

Hemos observado que la forma de emisión de radiación electromagnética más sencilla, es la dipolar, una antena gravitacional no puede emitir este tipo de radiación y la emisión más importante será la emisión cuádrupolar. La naturaleza de la señal es obviamente también diferente. Mientras que la antena funciona por inducción electromagnética, la gravitacional detecta la onda construyendo un arreglo experimental muy sensible que mida la distorsión del espacio-tiempo cuando la onda pase.

DETECCIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES

En esta sección vamos a revisar los intentos de detectar las ondas gravitacionales. Es decir, de realizar el análogo del experimento de Hertz. Como veremos, debido a su debilidad, las ondas gravitacionales son difíciles de detectar y se tienen que implementar dispositivos (antenas gravitacionales) extremadamente sensibles para ello. También veremos que dependiendo del ancho de banda de frecuencias que se quieran detectar, las antenas gravitacionales varían en tamaño y diseño. Revisaremos principalmente las antenas de masa resonante y las de interferometría láser ya que son las más comúnmente utilizadas, sin que por ello signifique que estas son los únicos tipos de antenas gravitacionales (para mayores detalles, ver referencias^{11,12,13}).

Detectores de masa resonante

El primer físico que se dedicó a diseñar y construir dispositivos para la detección de ondas gravitacionales fue Joseph Weber. Weber propuso en los años 60's del siglo XX el primer detector de masa resonante (de primera generación). El experimento consistía en la observación de las pequeñísimas oscilaciones de un cilindro masivo sólido a la frecuencia de resonancia del propio cilindro. Weber también estudió las oscilaciones simultáneas de dos

cilindros separados una gran distancia. Originalmente uno de los cilindros fue puesto en la Universidad de Maryland (en donde Weber laboraba) y el otro en el laboratorio Nacional de Argonne, separados por una distancia aproximada de 1,000 km.

Para ser más precisos, el método consistía en aislar una barra cilíndrica de aluminio de las vibraciones del medio ambiente, de aproximadamente 1.5 toneladas originalmente a la temperatura ambiente (Generaciones futuras de este tipo de antenas gravitacionales se diseñaron con un dispositivo que mantiene el sistema a una temperatura muy baja, menos de 0.1 grados Kelvin, con el fin de disminuir el ruido térmico el cual limita considerablemente la sensibilidad del detector). El cilindro es aislado acústicamente suspendiéndolo por medio de un alambre e introduciéndolo a una cámara de vacío. Con esto se aísla el dispositivo de señales mecánicas externas incontrolables, como sismos, rayos, etc. Parte de la superficie del cilindro está con cubierta de cristales piezoeléctricos los cuales sirven de transductor para convertir las vibraciones mecánicas en señales eléctricas para su procesamiento. Con esta antena, Weber fue capaz de detectar desplazamientos del orden de 10^{-16} cm. en las tapas del cilindro (ver figura 4).

Las generaciones posteriores de detectores de tipo de masa resonante han sido mejoradas y ha aumentado la sensibilidad de detección. Se ha



Fig.4. Joseph Weber fue el primer físico que se dedicó a diseñar y construir dispositivos para la detección de ondas gravitacionales. Weber propuso en los años 60's del siglo pasado el primer detector de masa resonante.

observado que esto ocurre cuando:

- a. La masa del cilindro aumenta,
- b. El factor de calidad Q aumenta,
- c. Hay buen registro electrónico de la señal y
- d. Muy baja temperatura para evitar el ruido térmico.

Se han contruido detectores con diversos materiales como niobio y zafiro, así como de diferentes pesos de 2 a 6 toneladas.

Interferómetros de láser

Otra propuesta ha sido el uso de la interferometría láser en la búsqueda de la detección de ondas gravitacionales. Las propuestas más recientes son el observatorio LIGO (Laser Interferometer Gravitational Observatory), construido en Hanford WA y Livingston LA EUA, (ver figuras 5 y 6). El arreglo consiste de 4 semiespejos de zafiro distribuidos a lo largo de 2 brazos perpendiculares (ver figura 7). La distancia típica L entre espejos de cada brazo es de $L=4000$ m. Los espejos se cuelgan como péndulos tal que a frecuencias muy altas (comparadas con la frecuencia natural del péndulo), oscilan libremente en la dirección horizontal.

El funcionamiento del dispositivo es como sigue: se envía un rayo láser de alta potencia (de 10 watts), desde la fuente, el rayo es dividido en 2 rayos (en el separador del haz) que se propagan sobre cada brazo. Los rayos se reflejan en espejos completamente reflectantes y finalmente se colectan en un foto-detector.

Recuérdese que las soluciones (20) y (21) de la ecuación de desviación geodésica (19) implicaban que dos partículas (en este caso, los dos espejos de zafiro) en un campo gravitacional se debían acercar en una dirección ($L - \Delta L$) y alejar en la dirección perpendicular ($L + \Delta L$) o viceversa. Ambas direcciones son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda gravitacional.

En el caso en el que no existe la interacción de la onda con el detector, en el patrón de interferencia aparece una fase que no es modificada en el tiempo. Conforme la onda es registrada en LIGO, se registra un cambio de fase debido al movimiento relativo de los espejos.

Si pudiera tomarse en cuenta el ruido que causan las fluctuaciones en la frecuencia del láser,



Figs. 5 y 6. Observatorio LIGO (Laser Interferometer Gravitational Observatory), construido en Hanford WA y Livingston LA EUA. Los desarrollos tecnológicos de GEO600 serán implementados en LIGO, lo cual llevará a una segunda generación de observatorios de ondas gravitacionales (LIGO II).

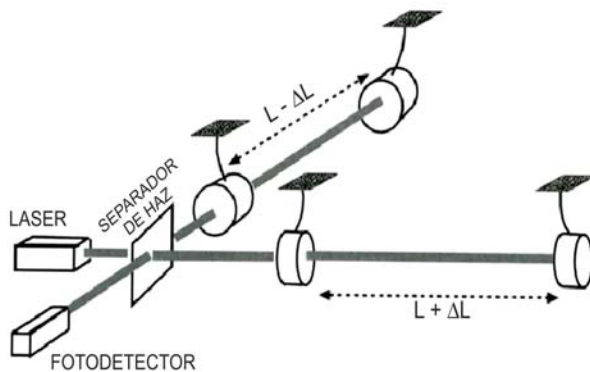


Fig. 7. Los detectores de ondas gravitacionales terrestres basados en la interferometría láser (como los utilizados en LIGO, VIRGO, GEO600 y AIGO) consisten en un arreglo de 4 semiespejos de zafiro de 40 kg. cada uno) distribuidos a lo largo de 2 brazos perpendiculares. Los espejos se cuelgan como péndulos tal que a frecuencias muy altas (comparadas con la frecuencia natural del péndulo, oscilan libremente en la dirección horizontal).

las vibraciones sísmicas, el ruido térmico en los soportes pendulares, los cambios azarosos en el índice de refracción del gas residual que queda en el interferómetro y algunas otras fuentes de error, se alcanzaría la alta sensibilidad requerida.

El ancho de banda que tendrán tales detectores es de 10 Hz hasta 10 kHz, las cuales son frecuencias relativamente altas para las longitudes de onda típicas de las ondas gravitacionales.

Las ondas gravitacionales que se lograrán detectar en LIGO llegan tan débiles a la tierra que producirán una deformación del espacio del orden $h(t) \approx 10^{-21}$. La sensibilidad necesaria para detectar la onda se puede estimar mediante la fórmula: $\Delta L = h(t) \times L = 10^{-17}$ m. Para darse una idea de la enorme sensibilidad que lograrán tales detectores, esto equivale a que al medir el diámetro de la tierra pudiéramos detectar variaciones en la distancia del orden del tamaño de un núcleo atómico.

Actualmente existen varios observatorios de interferometría. La colaboración LIGO es una colaboración Caltech/MIT EUA, aunque participan muchos físicos e ingenieros de diferentes naciones. El VIRGO es un detector en Pisa, Italia y es una colaboración Franco-Italiana ($L=3,000$ m.). El GEO600 es una colaboración entre Alemania y la Gran Bretaña y el detector se encuentra localizado en Hanover, Alemania ($L=600$ m.). Finalmente el AIGO, es un detector en Australia del mismo tamaño de brazo que el GEO600, ($L=600$ m.).

La colaboración GEO600 está actualmente desarrollando tecnología avanzada para ser implementada allí y también en LIGO cuya operación se reiniciará en 2008. Dichas mejoras aumentarán la sensibilidad de LIGO (LIGO II) por un factor de 10.

Pero, ¿Qué eventos astrofísicos pueden originar las ondas gravitacionales que serán detectados en las colaboraciones internacionales antes mencionadas? Entre ellos se piensa en procesos como los siguientes:

- El big bang

El estudio de la dinámica galáctica a distancias enormes en nuestro universo, es sinónimo de estudio de esos procesos en el pasado. La edad de nuestro universo, se estima en cerca de 14,000

millones de años. Actualmente se piensa que nuestro universo comenzó en ese tiempo con una gran explosión (llamada así, por su nombre en inglés, Big Bang). Se estima que 300,000 años después de dicha explosión, la materia de nuestro universo se desacopló de la radiación electromagnética, dando lugar a la posibilidad de la formación de estructura, esto es, de átomos, moléculas y con esto a elementos químicos ligeros. Por procesos gravitacionales locales, se formaron las estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias. En años recientes esta etapa de desacople y la formación de estructura se ha entendido bastante con la ayuda de los datos observacionales de los telescopios espaciales Hubble y WMAP. El Hubble ha obtenido un mapa del fondo de microondas y el WMAP lo ha hecho con mucha más resolución y se ha podido determinar las fluctuaciones de dicho fondo alrededor de los 3 grados Kelvin.^{2,14} Uno podría preguntarse si hay manera de observar nuestro universo antes de los 300,000 años y la respuesta es que esto es posible solo mediante la observación de las ondas gravitacionales primordiales producidas en la misma gran explosión. El ancho de banda que se espera para este tipo de ondas primordiales es de: 10^{-15} - 10^{-18} Hz, esta se llama banda ELF (Extremely Low Frequencies).

- Pulsares binarios y defectos topológicos

Las ondas gravitacionales en la banda de frecuencias VLF (Very Low Frequencies) está en 10^{-7} - 10^{-9} Hz y corresponde justamente a las emitidas por el pulsar binario de Taylor-Hulse. También podrían corresponder con procesos astrofísicos en el universo temprano de objetos exóticos como los siguientes defectos topológicos: monopolos magnéticos, cuerdas cósmicas, paredes de dominio, texturas y combinaciones de ellos.

- Explosión de Supernovas y Colapso de estrellas de neutrones binarias

Hoyos negros súper-masivos ($M \approx 1000 - 10^{18}$ masas solares) en el universo distante, objetos exóticos hipotéticos como estrellas solitónicas y singularidades desnudas y estrellas binarias (enanas blancas, estrellas de neutrones y hoyos negros) en nuestra galaxia, son fuertes candidatos

a producir ondas gravitacionales con un ancho de banda 10^{-4} - 1 Hz que corresponde a la banda LF (*Low Frequency Band*). El proyecto futuro LISA que describiremos brevemente en la próxima subsección, operará en este rango de frecuencias.

- Hoyos negros ligeros, supernovas, pulsares

La colisión de hoyos negros ligeros (1–1000 masas solares) en el universo distante, con sus fuertes campos gravitacionales daría lugar a un solo hoyo negro con la fuerte emisión de ondas gravitacionales. La enorme intensidad del campo gravitacional impediría que la radiación electromagnética salga en el proceso de colisión, de tal manera que sería imposible observar dicho evento electromagnéticamente, y solo a través de ondas gravitacionales sería detectable. Entonces la radiación gravitacional nos daría la única posibilidad de obtener información de procesos astrofísicos extremos en regiones en donde ocurren procesos que involucran grandes intensidades del campo gravitacional y velocidades relativistas en donde la aproximación Newtoniana (de campo débil) no entra en juego. Las frecuencias típicas a las que dan lugar este tipo de procesos corresponden a la HF (High Frequency Band) ($1 - 10^4$ Hz) que son justamente a las que está operando LIGO. En este intervalo de frecuencias se encuentran también procesos en supernovas, pulsares y colisiones de estrellas de neutrones.

Proyectos futuros de antenas gravitacionales

Uno de los proyectos más alentadores es el llamado LISA (Laser Interferometer Space Antenna), el cual consistirá de tres naves espaciales que formaran un triángulo equilátero con lados de 5 millones de kilómetros. El centro del círculo que contiene dicho triángulo se pondrá en la misma órbita de la tierra con una orientación de 20 grados entre el radio-vector sol-tierra, como lo muestra la figura 8. Cada nave tendrá un láser de tal manera que las tres naves estarán conectadas por el láser y podrá sensar la distancia de separación entre ellas con una precisión asombrosa. Al igual que con LIGO, el paso de una onda gravitacional

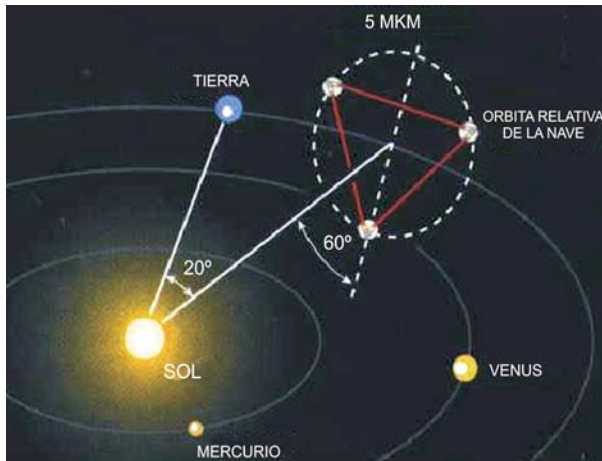


Fig. 8. El observatorio LISA (Laser Interferometer Space Antenna), nos dará resultados ortogonales a los de LIGO, en el sentido que LISA rastrearía una banda de frecuencias más bajas (LF) que LIGO (HF), y así buscaría fuentes distintas. El observatorio LISA está planeado para comenzar a operar en el año 2011.

distorsionará el espacio-tiempo con una magnitud de $h \approx 10^{-21}$, tal que provocará una separación o acercamiento $\Delta L \approx 10^{-11}$ m. entre las naves que será medida por LISA. Los resultados que arroje LISA serán ortogonales a los de LIGO, en el sentido que LISA rastrearía una banda de frecuencias más bajas (LF) que LIGO (HF), y así buscaría fuentes distintas. El observatorio LISA está planeado para comenzar a operar en el año 2011.

COMUNICACIONES CON ONDAS GRAVITACIONALES

Finalmente nos gustaría agregar unos comentarios acerca de la posibilidad futura de utilizar las ondas gravitacionales para las comunicaciones en nuestro universo. Si bien la dificultad obvia es la extrema debilidad de las ondas, lo cual hace difícil su detección, la mayoría de los físicos están convencidos que están allí, sin embargo habrá primero que demostrar su existencia. Una vez que su existencia sea probada uno se podría preguntar acerca de si dichas ondas, similarmente a las ondas electromagnéticas, podrían ser utilizadas como medio para transmitir información. Hemos visto muchas diferencias entre ellas que deben de tomarse en cuenta para considerar dicha posibilidad factible. Es de esperarse implementar toda la teoría de antenas, de líneas de transmisión y de guías de onda a la

generación y recepción de ondas gravitacionales. Más aún, uno podría establecer la propia descripción del procesamiento de señales su modulación (amplitud AM, Frecuencia FM, etc.) para una señal de audio o de video que se desee procesar para transmitir a través de radiación gravitacional (para mayores detalles, ver refs.^{15,16,17}). El análisis de guías de onda gravitacionales como configuraciones de galaxias que facilitan la transmisión de la propagación de ondas gravitacionales ha sido recientemente analizado en la referencia¹⁸.

Este es un tema bastante nuevo donde la mayor parte de la teoría está por hacerse, más aún, la parte experimental para la detección de las propias ondas gravitacionales es hoy en día la parte más excitante dejando para un futuro, quizá no muy lejano, el desarrollo de tecnología de comunicaciones para la transmisión de la información mediante ondas gravitacionales, mientras tanto esperamos aprender mucho de esta interrelación entre física teórica, física experimental y la ingeniería de las comunicaciones. Uno de los objetivos de este artículo ha sido el de mostrar algunos aspectos de esta grandiosa aventura de la detección de las ondas gravitacionales y de ser posible motivar a los lectores a participar en esta enorme y emocionante tarea.

REFERENCIAS

1. E. Braun, Electromagnetismo: De la Ciencia a la tecnología, la ciencia desde México, 112, Fondo de Cultura Económica, 1992.
2. S.W. Hawking, El Universo en una cáscara de nuez, Crítica/Planeta Barcelona (2001).
3. H. García Compeán, T. Matos, La influencia de Einstein en la física moderna, avance y perspectiva, 23 Num. 4, Octubre-Diciembre 2004, pp. 7-17.
4. D. Griffiths, Introduction to Electrodynamics, Prentice-Hall (1989).
5. F. Kuhlmann y A.A. Concheiro, Información y Telecomunicaciones, Serie "La ciencia para todos", 2003, 149, Fondo de Cultura Económica.
6. C.W. Misner, K.S. Thorne y J.A. Wheeler, Gravitation, W.H. Freeman and Co. New York, 1973.

7. J. Weber, *General Relativity and Gravitational Waves*, Interscience, New York 1961.
8. K.S. Thorne, *Gravitational Radiation*, in *Three Hundred Years of Gravitation*, S.W. Hawking and W. Israel (Eds.) (1987) Cambridge University Press, pp. 331-445.
9. J. Flores Valdés, *La Gran Ilusión III. Las ondas gravitacionales*, Editorial Fondo de Cultura Económica (La ciencia para todos) Segunda Edición, 1997.
10. R.A. Hulse y J.H. Taylor, *Discovery of a Pulsar in a Binary System*, *Astrophys. J.* 195, L51-L53 (1975); J.H. Taylor y J.M. Weisberg, *Further Experimental Tests of Relativistic Gravity Using the Binary Pulsar PSR 1913+16*, *Astrophys. J.* 345, 434-450.
11. R. Weiss, *Gravitational Radiation*, *Rev. Mod. Phys.* 71, (1999) S187-S196.
12. K.S. Thorne, *Warping Space-time*, *Sixty anniversary of S.W. Hawking*, (2004) pp. 74-104.
13. P.S. Shawhan, *La detección de las ondas gravitacionales*, *Investigación y Ciencia*, 349, Octubre 2005.
14. T. Matos, *¿De qué está hecho el universo?* Serie "La ciencia para todos", 2004, Fondo de Cultura Económica.
15. J.D. Kraus, *Will Gravity-Wave Communication Be Possible?*, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 33, No. 4, August 1991.
16. M.A. Lewis, *Gravitational Wave Vs Electromagnetic Wave Antennas* *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, June 1995.
17. M.A. Lewis, *Gravitational Waves for Voice and Data Communication*, *American Anti-gravity*, HFGW-03-109, (2003), <http://www.americanantigravity.com/articles/179/1/Gravitational-Waves-for-Voice-and-Data-Communication>.
18. G. Bimonte, S. Capozziello, V. Man'ko y G. Marmo, *Cosmological Waveguides for Gravitational Waves*, *Phys. Rev. D* 58 104009. (1998).