

TÍTULO.

OLAS GRAVITACIONALES EN EL OCÉANO CÓSMICO.

CLAVE DE REGISTRO DE PROYECTO

CIN2018A20074

ESCUELA DE PROCEDENCIA

CENTRO UNIVERSITARIO MÉXICO, A.C.

AUTORES

ENRIQUE JIMÉNEZ GUEVARA

RUBÉN BARRAGÁN MACÍAS

CAMILA SALINAS CABALLERO

REGINA VILLAR DEL VALLE

ASESOR

JESÚS FLORES TÉLLEZ.

ÁREA DE CONOCIMIENTO

CIENCIAS FISICOMATEMÁTICAS Y DE LAS INGENIERÍAS

DISCIPLINA

FÍSICA

TIPO DE INVESTIGACIÓN

DOCUMENTAL.

LUGAR Y FECHA

CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO. A 16 DE FEBRERO DE 2018

ÍNDICE.

RESUMEN EJECUTIVO.....	3
INTRODUCCIÓN.....	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
OBJETIVOS.....	6
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	6
HIPÓTESIS.....	9
METODOLOGÍA.....	10
RESULTADOS.....	10
CONCLUSIONES.....	17
APARATO CRÍTICO.....	18

RESUMEN EJECUTIVO.

RESUMEN.

El 11 de febrero de 2016, se confirmó la primera detección directa de una onda gravitatoria en el laboratorio LIGO en los Estados Unidos. Las ondas gravitacionales, a pesar de su difícil detección, nos permiten abrirle la puerta a un conocimiento mucho más descriptivo y exacto de nuestro universo ya que son una emisión de energía generada a partir de la interacción de masas enormes y densas, aceleradas a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, con el espacio-tiempo. El objetivo de nuestro proyecto es entonces, realizar una investigación histórica y teórica de la evolución de la idea de ondas gravitacionales, para así poder entender de mejor manera su importancia y sus posibles aplicaciones a futuro.

Palabras clave: LIGO, ondas gravitacionales, universo, energía, espacio-tiempo, aplicaciones.

ABSTRACT.

On February the 11th, 2016, it was confirmed that the first gravitational wave was detected by LIGO labs in the United States. Despite of how difficult it is to detect a gravitational wave, they mean to us a whole new way and source of knowledge, this being descriptive and precise as no other. We encounter gravitational waves due to the interaction of humongous masses with humongous densities and accelerated to speeds near the speed of light, with space-time. What we want of our Project, is to have a historic and theoretical investigation of gravitational waves, in order to understand them and their future applications.

Key words: LIGO, gravitational wave, space-time, applications.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La luz ha sido para los astrónomos una de las fuentes más importantes para el conocimiento y descripción del universo, sin embargo, con el descubrimiento de las ondas gravitacionales, abrimos una puerta hacia un estudio y una descripción del

universo mucho más veraz y objetiva. Éstas, forman parte de la última predicción de Einstein en su teoría de relatividad general.

Es por eso, que en nuestro proyecto pretendemos realizar una investigación sobre las ondas gravitacionales y su naturaleza, para conocer los fundamentos teórica que nos ayuden a comprenderlas la forma en que son detectadas y lo que podría ser su aplicación.

OBJETIVO.

Realizar una investigación de las características de las ondas gravitacionales para revisar sus posibles aplicaciones en un futuro, así como analizar los efectos de la gravedad en el espacio-tiempo; haciendo esta información accesible a estudiantes de nivel medio superior.

RESULTADOS DESTACADOS.

En su teoría de la Relatividad General, postulada en 1915, Einstein sugiere que la Tierra recibe un baño continuo de energía que se origina en las interacciones gravitatorias de estrellas distantes. Así, la energía desprendida por una perturbación cósmica, viaja alejándose de ella a la velocidad de la luz en forma de ondas gravitatorias, las cuales distorsionan la morfología de cualquier región del espacio que atraviesen.

Las perturbaciones cósmicas que pueden emitir ondas gravitacionales son pulsares, pulsares binarios, estrellas de neutrones, agujeros negros (y sus colapsos) y colapsos que desplieguen gran energía como las Supernovas.

Hoy en día, los astrónomos se han dado cuenta de que los pulsares orbitales binarios, son las fuentes más frecuentes en el cosmos, y de ellas se han estudiado sus emisiones de ondas gravitacionales.

Un pulsar, es una estrella de neutrones que rota enormes velocidades. Almacenan una cantidad de energía de rotación enorme. Son objetos compactos que poseen una densidad de materia enorme y un diámetro muy reducido que no supera los 30 km. Se

forman de la explosión de una Supernova, ya que el núcleo de la estrella colapsa y la energía gravitacional que se transforma en energía de rotación, alcanzando un periodo de rotación de 0.5 segundos.

En cuanto a su detección, el primer intento lo hizo Joseph Webber, siendo éste totalmente fallido. Hoy en día se tiene un principio diferente basado en la Interferometría láser. El laboratorio es llamado LIGO, que significa Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser.

El de 11 de febrero de 2016, se confirmó que la información obtenida el 14 de septiembre de 2015 se trataba efectivamente de una onda gravitacional, siendo esa su primera detección directa, en los laboratorios de LIGO.

CONCLUSIONES.

Debido a que gran parte de nuestra investigación la realizamos en revistas científicas especializadas más no de grado profesional pudimos obtener información bastante accesible para la audiencia profana por lo que podemos afirmar que cumplimos nuestro objetivo.

Efectivamente logramos comprender como es que las ondas interactúan con el espacio-tiempo a través del conocimiento de la teoría de relatividad general. Es por esto que aceptamos como válida la primera de nuestras hipótesis.

Por lo tanto, podemos concluir que las ondas gravitacionales realmente tienen una aplicación en el futuro, y no solo serían materia de estudio teórico, si no que tienen una aplicación totalmente tangible y visible. Incluso podríamos decir que las ondas nos ayudarían a comprender un poco más la gravedad.

HALLAZGOS Y RECOMENDACIONES.

Dentro de sus aplicaciones más directas, sabemos de antemano que la detección y entendimiento de las ondas gravitacionales nos permite pensar en una Astronomía mucho más exacta y mucho más descriptiva que la que la luz nos puede proveer. Es

así como, el futuro de la física y de la astronomía tienen un futuro bastante prometedor en el que las ondas gravitacionales juegan un papel de suma importancia.

El futuro para las ondas gravitacionales es prometedor. Hoy en día se está trabajando en un nuevo laboratorio llamado LISA, un interferómetro totalmente construido en el espacio, a base de un principio totalmente innovador, la Interferometría atómica, siendo mucho más efectiva gracias a su precisión y a sus distancias más largas. Es incluso dicho que, si al momento de instalar uno de estos laboratorios no se detecta alguna onda gravitacional, entonces éstas nunca existieron y estarían frente algo totalmente desconocido.

INTRODUCCIÓN.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La luz ha sido para los astrónomos una de las fuentes más importantes para el conocimiento y descripción del universo a pesar de ser una fuente de información corruptible y débil, sin embargo, con el descubrimiento de las ondas gravitacionales, las cuales forman parte de las últimas predicciones de la Teoría de la Relatividad de Einstein, abrimos una puerta hacia un estudio y una descripción del universo mucho más veraz y objetiva, basada en algo completamente distinto a la luz, como lo es la gravedad.

Es por eso que en nuestro proyecto pretendemos realizar una investigación sobre las ondas gravitacionales y su naturaleza, no sin antes realizar una base teórica que nos ayuden a comprenderlas y posteriormente vincularlas con lo que es su detección y lo que podría ser su futura aplicación.

OBJETIVOS.

Realizar una investigación de las características de las ondas gravitacionales para revisar sus posibles aplicaciones en un futuro, así como analizar los efectos de la gravedad en el espacio-tiempo; haciendo esta información accesible a estudiantes de nivel medio superior.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

Uno de los momentos más trascendentes de la Astronomía se presentó cuando Isaac Newton unificó y sintetizó la física terrestre y celeste a partir de la Ley de Gravitación Universal que incluía una fuerza fundamental de la naturaleza, llamada fuerza de gravedad, que permitía entender como los planetas se encontraban ligados en sus trayectorias elípticas al Sol dando una explicación total a las leyes empíricas de Kepler sobre el sistema solar. Esta "Fuerza de Gravedad" cuyo origen para Newton es misterioso, por su acción a distancia, produce una atracción que depende directamente de las masas de los cuerpos que interactúan e inversamente del cuadrado de la separación de estos. Dando Newton a la acción gravitacional un carácter dinámico, esto es, como un efecto de una fuerza, cuya información se transmite en el espacio de manera instantánea, lo cual actualmente no necesariamente es cierto.

Newton logró esta síntesis con base en la caída de una manzana en la superficie de la Tierra y su analogía con la caída de la Luna.

Para realizar esto, Newton asumió que la órbita de la Luna es un círculo, y que la atracción de la tierra se dirige siempre al centro de la misma y utiliza el radio medio de la Tierra (estimado por Eratóstenes) es decir, 6371 km. Y sabiendo que la Luna está a 60 veces el radio medio de la Tierra Si la masa m sobre la Tierra es atraída por una fuerza mg , y como lo asevera la "ley del inverso cuadrado" de Newton, luego la atracción sobre masas iguales a la distancia de la Luna será $60^2 = 3600$ veces menor e igualará $mg/3600$

Si m es la masa de la Luna, cual es la fuerza que mantiene a la Luna en su órbita. Si la órbita es un círculo, como $R = 60 R_E$ su longitud será: $2 \pi R = 120 \pi R_E$

Suponiendo que el tiempo necesario para recorrer una órbita es de T segundos. La velocidad v del movimiento es $v = \text{distancia}/\text{tiempo} = 120 \pi R_E/T$

La fuerza centrípeta que mantiene a la Luna en su órbita debe, por consiguiente, ser igual a

$$mv^2/R = mv^2/(60 R_E)$$

y si la gravedad de la Tierra suministra esa fuerza, entonces

$$mg/3600 = mv^2/(60 R_E)$$

dividiendo ambos lados por m y luego multiplicándolos por 60 lo simplifica a

$$g/60 = v^2/R_E = (120 \pi R_E)^2/(T^2 R_E)$$

Anula un factor de R_E , multiplicando ambos lados por $60 T^2$ y dividiéndolos por g nos da

$$T^2 = (864\,000 \pi^2 R_E)/g = 864\,000 R_E (\pi^2/g)$$

De manera providencial, en las unidades usa $g \sim 9.81$ que es muy parecido a $\pi^2 \sim 9.87$.

De tal forma que el término en paréntesis es cercano a 1 y puede eliminarse. Esto nos deja:

$$T^2 = (864\,000) (6\,371\,000)$$

$$864\,000 = (929.5)^2 \quad 6\,371\,000 = (2524)^2$$

Luego

$$T \cong (929.5) (2524) = 2\,346\,058 \text{ segundos}$$

Para obtener T en días divide por 86400, el número de segundos en un día, para obtener

$$T = 27.153 \text{ días}$$

Muy cercano al valor aceptado de

$$T = 27.3217 \text{ días}$$

Newton vio correctamente esto como una confirmación de la "ley del inverso cuadrado".

Más de un siglo después, en 1796, su compatriota **Henry Cavendish** midió realmente en el laboratorio la débil atracción gravitacional entre muestras de material. Un siglo después de esto (como ya se ha dicho) el físico húngaro Lorand Eötvös mejoró grandemente la precisión de estas medidas.

Esta ley marcó el punto de referencia para todas las posteriores investigaciones astronómicas, hasta finales del siglo XIX cuando la Teoría Electromagnética de Maxwell, comienza a tener inconsistencia, en cuanto al medio en el que se transportan las ondas electromagnéticas y la comprensión del sistema de referencia respecto al cual se mide la velocidad de onda electromagnética u onda luminosa. Esta situación fue resuelta a principios del siglo XX por Albert Einstein que al estudiar "La electrodinámica de los cuerpos en movimiento" incluye una apartado sobre una nueva forma de entender la física en diferentes sistemas de referencia y que se llamó posteriormente "Teoría

Especial o Restringida de la Relatividad y que consiste en la búsqueda de formular todas las leyes físicas de forma que tengan validez para todos los observadores inerciales. Y sus dos principales postulados son:

1. Principio especial de relatividad: Las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales. En otras palabras, no existe un sistema inercial de referencia privilegiado, que se pueda considerar como absoluto.

2. Invariancia de c : La velocidad de la luz en el vacío es una constante universal, c , que es independiente del movimiento de la fuente de luz.

Algunos de las consecuencias de estos dos postulados son los siguientes

- Dilatación del tiempo
- Contracción espacial
- Limite universal a la velocidad
- Simultaneidad es relativa al sistema de referencia.

Cuando la Teoría Especial de la Relatividad no es capaz de explicar los fenómenos que se presentan en sistemas de referencia no inerciales o acelerados o en presencia de campos gravitacionales, Einstein propone una nueva versión de la su teoría a que se le nombró "Teoría general de la Relatividad". Esta nueva visión permite entender a los campos gravitacionales como sistema de referencias no inerciales, que a su vez se pueden comparar con sistemas de referencia inerciales locales, donde aspecto local se refiere a regiones pequeñas del espacio. Esta nueva visión le permite entender la gravedad como una deformación del espacio-tiempo, esto es, como un efecto geométrico del espacio y no como un carácter dinámico que Newton propuso.

La Teoría General de la Relatividad asegura que ninguna información puede viajar más rápido que la velocidad de la luz, incluyendo la información acerca de las posiciones de las masas en el universo, que se comunica mediante el campo gravitatorio. La relatividad general predice un cambio en el campo gravitatorio que se propaga por el universo a la velocidad de la luz. Justamente estos cambios en el campo gravitatorio son las ondas gravitacionales.

HIPÓTESIS.

Si logramos comprender los efectos de la gravedad en el espacio-tiempo bajo la visión de la Teoría de Relatividad General, entonces podremos conocer cómo interactúan las ondas gravitacionales con el espacio-tiempo.

Si logramos comprender las consecuencias del choque de cuerpos celestes masivos, así como la interacción de estrellas binarias y la alta velocidad de rotación de cuerpos celestes de gran densidad, entonces comprenderemos la generación de las ondas gravitacionales y cómo se logró su medición.

Si comprendemos la generación de las ondas gravitacionales, entonces podremos obtener información sobre los eventos que produjeron dichas ondas.

METODOLOGÍA.

Se realizó una investigación documental de las ondas gravitacionales, sus características, su detección y posibles aplicaciones a partir de la Teoría de la Relatividad General, para contestar a las siguientes preguntas básicas:

- ¿Qué relación existe entre la Teoría General de la Relatividad y las ondas gravitacionales?
- ¿Qué fenómenos astronómicos pueden ser fuentes de ondas gravitacionales y por qué?
- ¿Cuáles son los efectos que producen las ondas gravitacionales, esto es, como interactúan con el espacio-tiempo?
- Reseña histórica de los detectores de ondas gravitacionales.
- ¿En qué consiste el detector de ondas gravitacionales de LIGO?

Dicha investigación la realizamos con referencias de la biblioteca de la facultad de ciencias de la UNAM y con artículos de divulgación científica publicados en una revista de ciencias.

RESULTADOS.

1. ECUACIÓN DE CAMPO.

La ecuación de Einstein que sintetiza la interacción entre la masa del universo y la geometría del espacio-tiempo es:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

geometría del espaciotiempo

distribución de materia
y energía

@jediaz_

Esta ecuación se puede resumir en esta frase: “El espacio le dice a la masa como debe moverse y la masa le dice al espacio como debe curvarse”.

Las ecuaciones de Einstein determinan las características de la variedad métrica, nuestro espacio-tiempo, a partir de la distribución de masa y energía que puebla el espacio. Dicha distribución de masa y energía viene descrita por el tensor de energía-impulso, que se define como la densidad de la componente constante.

Dado que todos los tensores que aparecen en las Ecuaciones de Einstein son simétricos, tenemos tan sólo diez ecuaciones de Einstein. Cuatro de ellas, las que tienen, no son ecuaciones dinámicas, por lo que tan sólo nos quedan seis ecuaciones dinámicas a resolver.

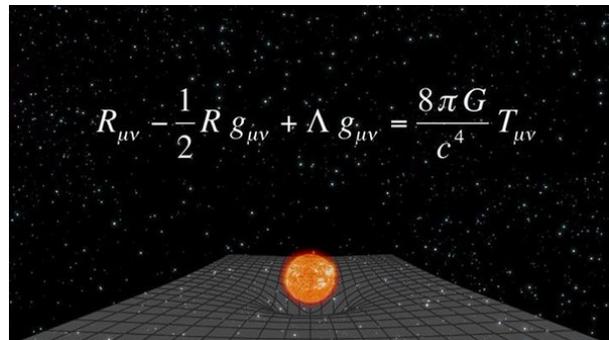


Fig. 1 Ecuación de campo

Dichas ecuaciones determinan como la distribución de masa y energía afectan a la geometría del espacio-tiempo (descrita por que, en último término, depende únicamente de la métrica). Y viceversa, determinan como la geometría del espacio-tiempo afecta al movimiento de la masa y energía distribuida por el mismo. Estas afectaciones al campo gravitatorio, que se propagan a la velocidad de la luz, son las ondas gravitacionales.

2. GRAVEDAD DE MAREA.

La fuerza de marea es un efecto secundario de la fuerza de la gravedad que es responsable de la existencia de las mareas. Es el resultado de la diferencia de la fuerza gravitacional que existe a lo largo del diámetro de un cuerpo. Cuando un cuerpo de tamaño suficientemente grande es alterado por la fuerza gravitatoria de otro cuerpo a cierta distancia, la diferencia en la magnitud de la fuerza de gravedad entre el extremo cercano y el lejano puede ser grande. Este hecho altera la forma del cuerpo grande sin cambiar su volumen. Suponiendo que inicialmente la forma era una esfera, la fuerza de marea tenderá a convertirla en un elipsoide.

2.1 GRAVEDAD DE MAREA EN LA TEORIA DE RELATIVIDAD GENERAL.

En relatividad general, las fuerzas de marea son particularmente importantes, ya que, más que un efecto secundario, proporcionan el ingrediente básico para la formulación de la teoría. De acuerdo con la teoría de la relatividad, el campo gravitatorio es un efecto de la geometría curvada del espacio-tiempo, las partículas materiales se mueven a lo largo de líneas geodésicas de este espacio-tiempo curvo. Si seguimos la pista a un conjunto o nube de partículas en "caída libre" en un campo gravitatorio, la curvatura del espacio-tiempo se hace manifiesta en la "convergencia" o acercamiento de las líneas geodésicas que seguiría una nube de partículas, el acercamiento de las partículas de una nube puede ser interpretada como fuerzas de marea.

3. INTERFEROMETRÍA

En la interferencia, dos ondas se pueden sumar de manera ya sea constructiva o destructiva. En la interferencia constructiva la amplitud de la onda resultante es mayor que la de cualquiera de las ondas individuales. Mientras que en la destructiva la amplitud resultante es menor que la de cualquiera de las ondas individuales.

Las ondas electromagnéticas experimentan interferencia surgida de la combinación de los campos eléctricos y magnéticos que constituyen las ondas individuales. Para observar una interferencia sostenida entre dos fuentes de luz se debe satisfacer las siguientes condiciones:

1. Las fuentes deben ser coherentes, es decir, deben mantener una fase constante una respecto a la otra.
2. Las fuentes deben tener idéntica longitud de ondas.
3. Debe ser aplicable el principio de superposición.

Se necesitan dos fuentes coherentes para crear interferencia. Si se colocan dos fuentes de luz una a lado de la otra, no se observan efectos de interferencia porque las ondas luminosas provenientes de una de las fuentes se emiten de manera independiente respecto a las ondas que provienen de la otra fuente por tanto las emisiones de las dos fuentes no mantienen una relación de fase constante una con otra durante el tiempo de observación.

Una fuente de luz ordinaria experimenta cambios al azar alrededor de una vez cada 10^{-8} seg. El resultado es que no se observan efectos de interferencia porque el ojo no puede seguir este tipo de cambios a corto plazo. Se dice que las fuentes de luz de este tipo son incoherentes.

Si dos fuentes puntuales idénticas S_1 y S_2 emiten ondas esféricas con la misma longitud de onda, cabe esperar que el espacio que las rodea contenga alguna pauta de interferencia. Suponiendo que las dos fuentes continúan emitiendo luz en fase, entre sí, las ondas que llegan a un punto P arbitrario, se interfieren en una forma estable y observable. Su fase relativa (δ) en P determinará con exactitud cómo interfieren y δ dependerá del índice de refracción del medio y de la longitud de la trayectoria recorrida por las ondas. Si una ruta (r_1) es mayor que la otra (r_2) en la mitad de una longitud de onda ($r_1 - r_2 = \frac{1}{2} \lambda$) entonces $\delta = 180^\circ$ y se presenta interferencia destructiva: las ondas llegan desfasadas, los valles se superponen a los picos y se anulan entre sí.

Y P aparece como una mancha negra. Lo mismo sucedería si la diferencia entre las trayectorias fuera $1 \frac{1}{2} \lambda$ o $2 \frac{1}{2} \lambda$ o 3... y así sucesivamente; en forma más general se presentan mínimos de irradiación cuando

$$(r_1 - r_2) = m' \frac{\lambda}{2}$$

En donde $m' = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots$ de igual manera si la diferencia de trayectorias corresponde a λ o 2λ las ondas que se traslapan llegarían en fase, $\delta = 0$ de manera equivalente, 2π o 4π o 6π , etc. Entonces, en general se presenta un máximo cuando:

$$(r_1 - r_2)\dot{\phi} = m\lambda$$

Donde $m = 0, \pm 1, \pm 2$

Supongamos que el miembro de la derecha de esas dos ecuaciones se mantiene fijo (esto es, $m' = \text{constante}$ o $m = \text{constante}$) entonces, el miembro de la izquierda representa todos lugares posibles de P para los que $(r_1 - r_2)\dot{\phi} = \text{constante}$. Pero si la diferencia en la distancia desde cualquier punto P hasta dos puntos fijos S_1 y S_2 , es constante, como en este caso, los lugares de P que satisfacen las ecuaciones forman una familia de hipérbolas: es la definición de la hipérbola. En tres dimensiones una pantalla vertical colocada en P, perpendicular al plano de S_1 y S_2 , estará cubierta con bandas verticales claras y oscuras, que se llaman franjas o bandas de interferencia.

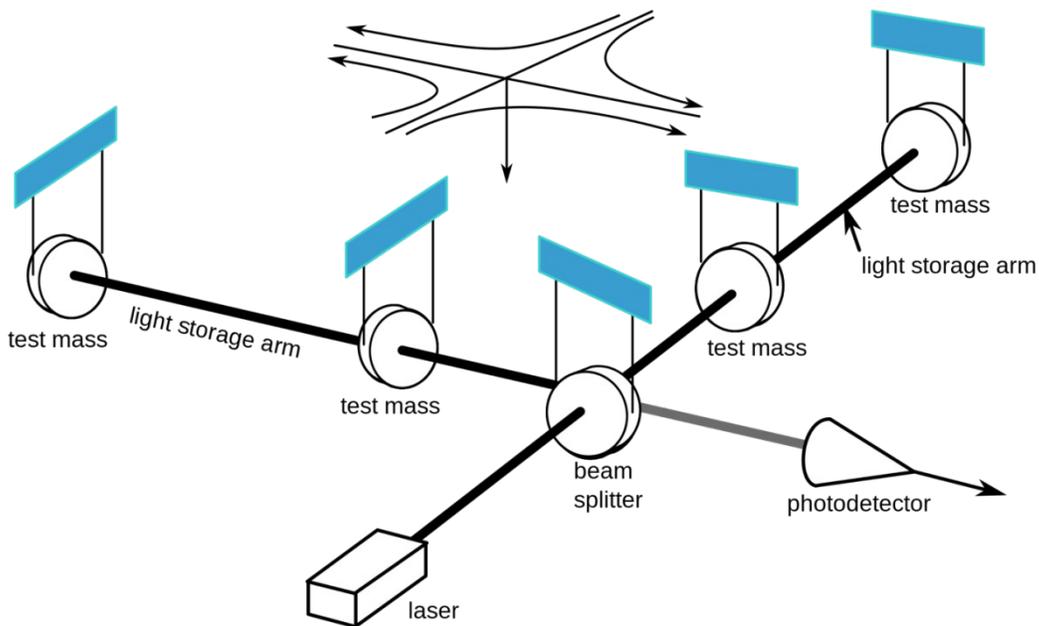


Fig. 2 Modelo de Interferómetro.

En lugar de distribuirse uniformemente, la energía se desvía fuera de ciertas áreas y dentro de otras; lo que falta en los mínimos aparece en los máximos: la energía se conserva.

ONDAS GRAVITACIONALES.

Las ondas gravitacionales son perturbaciones del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Se generan a amplitudes detectables en algunos de los fenómenos más violentos del universo, como las colisiones de agujeros negros.

Tales ondas constituyen una consecuencia inevitable de la teoría de la relatividad general de Einstein. Sin embargo, y a pesar de décadas de búsqueda experimental, hasta hace poco no habían sido detectadas de forma directa.

Ese objetivo fue logrado hace poco más de un año por el experimento estadounidense LIGO. El éxito fue posible gracias a numerosos avances clave en las técnicas de detección, modelización y análisis de los datos.

El 11 de febrero de 2016 los científicos del observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferómetro Laser (LIGO) en Estados Unidos y el observatorio Virgo en Italia anunciaban un descubrimiento histórico, la primera observación directa de ondas gravitacionales, las perturbaciones del espacio-tiempo predichas por la teoría de la relatividad general de Albert Einstein, la publicación del hallazgo llega cinco meses después de la detección la cual fue acontecida el 14 de septiembre de 2015 a las 9:50 horas.

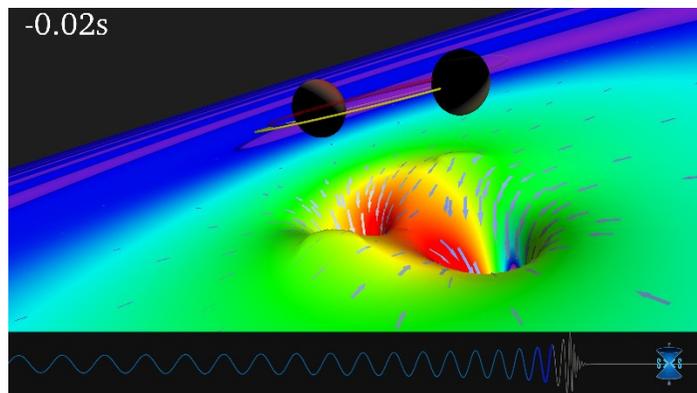


Fig. 3 Representación de deformación del espaciotiempo causado por la gravedad.

¿Qué aprenderemos de la radiación gravitatoria cuando se detecte? Mucho acerca de lo que sucede en el universo, gracias a una nueva manera de hacer astronomía.

Estudiaremos la física de la gravedad y del espacio - tiempo de manera inédita; los resultados confirmarán lo que creemos saber —esto es, la teoría de Einstein del espacio - tiempo— o nos enseñarán algo hasta ahora desconocido sobre el espacio - tiempo. Quizá nos sorprendan fenómenos nuevos; por ejemplo, estados radicalmente inéditos de masa y energía cuya existencia hasta ahora sólo hemos sospechado. Un tal descubrimiento arrojaría luz sobre la unificación de las ideas sobre el espacio y el tiempo con las relativas a la energía y los cuantos, quizá bajo la forma de una teoría de cuerdas, unificación que se cuenta entre los misterios más profundos de la física.

Se trata de una manera nueva de explorar la expansión cósmica; resultará más exacta y directa que las demás, siempre y cuando sea cabal nuestro conocimiento de la física de las fusiones de agujeros negros.

Este proyecto tropieza con una dificultad: hay que identificar la galaxia anfitriona en luz visible (porque necesitamos una medida independiente del corrimiento hacia el rojo, o estiramiento de las longitudes de onda a causa de la expansión del universo).

DONDE PODEMOS ENCONTRARLAS.

Las perturbaciones cósmicas que pueden emitir ondas gravitacionales son pulsares, pulsares binarios, estrellas de neutrones, agujeros negros (y sus colapsos) y colapsos que desplieguen gran energía como las Supernovas.

Hoy en día, los astrónomos se han dado cuenta de que los pulsares orbitales binarios, son las fuentes más frecuentes en el cosmos, y de ellas se han estudiado sus emisiones de ondas gravitacionales.

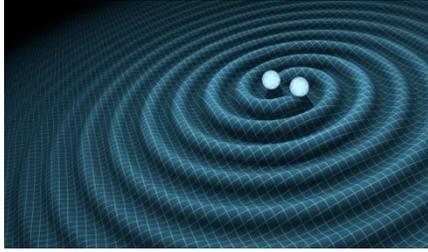


Fig. 4 Diagrama de pulsar binario. Supernova, el núcleo de la estrella colapsa y la energía gravitacional que contenía el astro se transforma en energía de rotación, dejándole un periodo de rotación cercano de 0.5 segundos.

Sus interacciones binarias, son las que dan origen al nombre “pulsares orbitales binarios”.

Las ondas gravitacionales interaccionan con la materia comprimiendo los objetos en una dirección y estirándolos en la dirección perpendicular. Por tanto, los más modernos detectores de ondas gravitacionales tienen forma de L y miden las longitudes relativas de sus brazos por medio de la Interferometría, que observa los patrones de interferencia producidos al combinar dos fuentes de luz. Dos de estos interferómetros están en los Estados Unidos - uno en Hanford, Washington, y otro en Livingston, Louisiana - y se llaman LIGO (siglas en inglés de Observatorio de Ondas Gravitacionales con Interferómetro Láser). LIGO es el mayor de los detectores de ondas gravitacionales, con sus brazos de 4 km de longitud (un poco menos de 2.5 millas); Otros detectores son VIRGO en Italia, GEO en Alemania y TAMA en Japón.



Fig. 5 LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (Observatorio de ondas gravitatorias por interferometría láser).

CONCLUSIONES.

Dentro de sus aplicaciones más directas, sabemos de antemano que la detección y entendimiento de las ondas gravitacionales nos permite pensar en una Astronomía mucho más exacta y mucho más descriptiva que la que la luz nos puede proveer. Es así como, el futuro de la física y de la astronomía tienen un futuro bastante prometedor en el que las ondas gravitacionales juegan un papel de suma importancia.

Hoy en día se está trabajando en un nuevo laboratorio llamado LISA, un interferómetro totalmente construido en el espacio, a base de un principio totalmente innovador, la Interferometría atómica, siendo mucho más efectiva gracias a su precisión y a sus distancias más largas. Es incluso dicho que, si al momento de instalar uno de estos laboratorios no se detecta alguna onda gravitacional, entonces éstas nunca existieron y estarían frente algo totalmente desconocido.

Por lo tanto, podemos concluir que las ondas gravitacionales realmente tendrán una aplicación en el futuro, y no solo serían materia de estudio teórico, sino que tienen una aplicación totalmente tangible y visible. Incluso podríamos decir que las ondas nos ayudarían a comprender un poco más la gravedad y del origen del universo.

Debido a que gran parte de nuestra investigación la realizamos en revistas científicas especializadas más no de grado profesional pudimos obtener información bastante accesible para el público en general por lo que podemos afirmar que cumplimos nuestro objetivo.

Efectivamente logramos comprender como es que las ondas interactúan con el espacio-tiempo a través del conocimiento de la teoría de relatividad general. Es por esto que aceptamos como válida la primera de nuestras hipótesis.

Ya que con la detección de la onda gravitacional se pudo dar detalles del evento generador, es posible utilizar la onda gravitacional para describir a estos eventos, por lo tanto, esto confirma la última de nuestras hipótesis.

APARATO CRÍTICO.

Thorne, K. S., (1994), (1994), *Agujeros negros y tiempo curvo. El escandaloso legado de Einstein*, Nueva York, Estados Unidos: W. W. Norton & Company.

Weisberg, J. M. (Diciembre de 1981). Ondas gravitatorias procedentes de un pulsar orbital. *Investigación y Ciencia*, 63, 12-22.

Sorazu, B. (Febrero de 2017). La observación de ondas gravitacionales con LIGO. *Investigación y Ciencia*, 485, 2-7.

Sexl, R., & Sexl, H. (1979). *White dwarfs-black holes:an introduction to relativistic astrophysics*. New York, New York: Academic Press.

Stephani, H., & Stewart, J. M. (1985). *General relativity: an introduction to the theory of the gravitational field*. Cambridge: Cambridge University Press.

Colaboración científica LIGO - La ciencia del LSC. (2018). *Ligo.org*. Retrieved 3 February 2018, from <https://www.ligo.org/sp/science/GW-Detecting.php>

El fenómeno de las mareas. (2018). *Sc.ehu.es*. Retrieved 7 February 2018, from <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/mareas/mareas.htm>

Comprueban la última predicción de Albert Einstein sobre ondas gravitacionales.

(2016). *BBC Mundo*. Retrieved 11 December 2017, from

http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/02/160211_ciencia_ondas_gravitacionales_relatividade_einstein_gtg