

Primera detección de ondas gravitacionales

First detection of gravitational waves

Oswaldo M. Moreschi

*Facultad de Matemática Astronomía, Física y Computación (FaMAF),
Universidad Nacional de Córdoba, Instituto de Física Enrique Gaviola
(IFEG), CONICET, Ciudad Universitaria,(5000) Córdoba, Argentina.*

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

E-mail: moreschi@fis.uncor.edu

(Recibido el 2 de mayo de 2016; aceptado el 3 de junio de 2016)

Resumen

Presentamos una breve descripción de la primera detección de ondas gravitacionales. Aprovechamos para comentar aspectos fundamentales de la relatividad general, incluyendo algunos antecedentes históricos. Se describe el funcionamiento básico de los detectores, como así también características principales de su construcción. Presentamos un estudio preliminar de la señal detectada en septiembre de 2015 por los observatorios de ondas gravitacionales LIGO.

Palabras clave: Ondas gravitacionales; Relatividad general; Agujeros negros.

Abstract

We present a brief description on the first detection of gravitational waves. We take the opportunity to comment on fundamental aspects of general relativity, including some historical remarks. The basic operation of the gravitational wave detectors is presented, along with the main characteristics of its construction. We present a preliminary study of the signal detected on September of 2015 by the LIGO observatories of gravitational waves.

Keywords: Gravitational waves; General relativity; Black holes.

I. INTRODUCCIÓN

A. ¿Qué es una onda gravitacional?

Todos estamos familiarizados con las ondas electromagnéticas que usamos para describir una serie de fenómenos. Por ejemplo, la emisión de ondas de una antena transmisora y la correspondiente recepción de un aparato de radio son bien descritas por el fenómeno de propagación de ondas electromagnéticas. Se puede usar la longitud de onda para caracterizar una onda, o también su frecuencia. Estas dos cantidades están relacionadas, dado que satisfacen $\lambda\nu = c$; donde c es la velocidad máxima de las interacciones, que coincide con la velocidad de la luz en el vacío.

Las ondas gravitacionales son los fenómenos análogos producidos por interacciones gravitatorias que viajan con la misma velocidad c . La gran diferencia con las primeras, es que las perturbaciones que involucran las ondas gravitacionales son tan débiles que son muy difíciles de producir y detectar.

Para producir ondas gravitatorias necesitamos que grandes cantidades de masa estén aceleradas. Por grandes cantidades de masa pensamos en, por ejemplo, las contenidas en una estrella de neutrones o en agujeros negros.

B. El pulsar binario PSR B1913+16

En relación con las estrellas de neutrones cabe señalar que en 1975 Hulse y Taylor descubrieron el pulsar binario PSR B1913+16 (Hulse Taylor, 1975).

Un pulsar es una estrella de neutrones que es observada por los pulsos electromagnéticos que emite. Una estrella de neutrones tiene un poco más de la masa del Sol, pero tiene un radio de solo unos 10 km. Es por esto que los campos gravitatorios cerca de una estrella de neutrones son muy altos.

El hecho de que el pulsar sea binario, significa que tiene una compañera, con la que está ligado gravitacionalmente.

En 1992 tuvimos la oportunidad de asistir a la charla de J.H. Taylor, cuando organizamos la conferencia GR13 en las sierras de Córdoba (Gleiser, Kozameh y Moreschi, 1992). En 1993 Russell Hulse y Joseph Taylor recibieron el premio Nobel por su descubrimiento.

Respecto de la conferencia GR13, cabe señalar que su nombre real es *Thirteenth International Conference on General Relativity and Gravitation*; que es la conferencia que se organiza cada tres años y reúne a los científicos de todo el mundo en el área de relatividad general. Es esa ocasión organizamos la conferencia, en las sierras de Córdoba, los integrantes del Grupo de Relatividad y Gravitación de FaMAF y fue la primera vez que dicha conferencia se realizó fuera de la zona de Europa y Estados Unidos.

El sistema del pulsar binario provee del primer caso en el cual se puede testear la pérdida de energía debida a la emisión de radiación gravitacional.

De manera similar al fenómeno de radiación electromagnética, cuando un sistema gravitante cambia con el tiempo puede emitir ondas gravitacionales.

Para el sistema binario, la existencia de la radiación gravitatoria significa que la energía mecánica del sistema se va perdiendo debido a la emisión de la radiación gravitatoria. Esto implica que las órbitas tienen un radio característico cada vez más corto, lo que a su vez está relacionado con que el período de la órbita va decreciendo con el tiempo.

La figura 1 muestra la variación del período de la órbita del sistema binario PSR B1913+16 como función del tiempo. Los puntos significan datos observacionales, mientras que la curva continua muestra la predicción teórica de la relatividad general, por lo que se tiene una excelente concordancia.

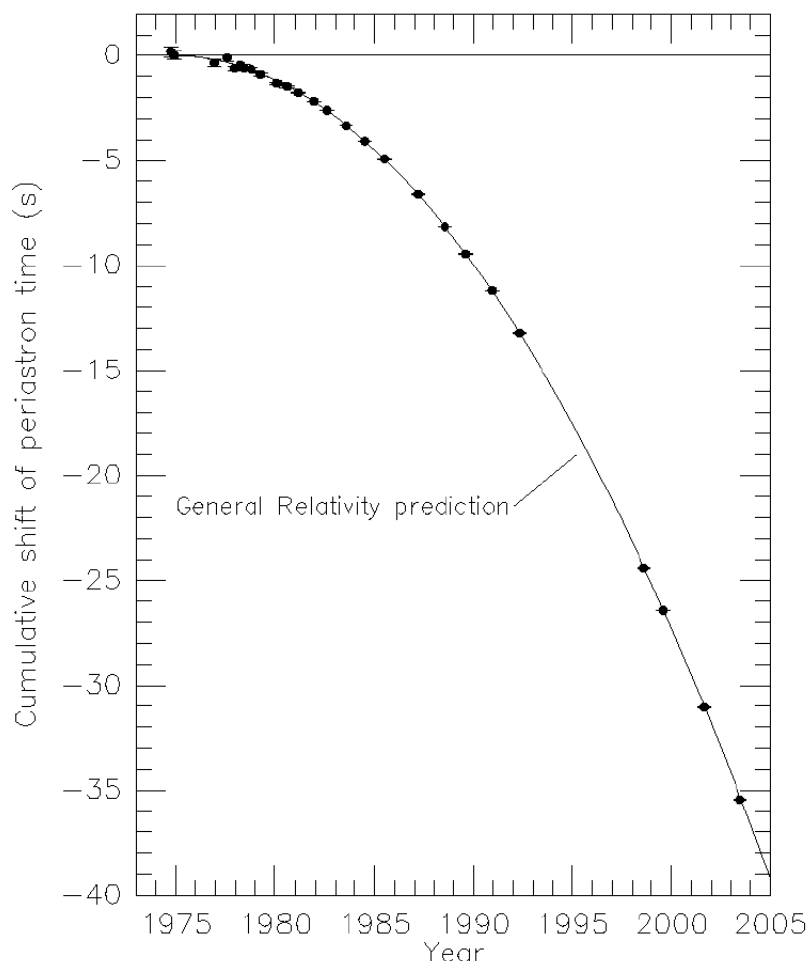


FIGURA 1. Decaimiento de la órbita del pulsar PSR B1913+16.

Esta concordancia tan precisa entre las mediciones y las predicciones de la relatividad general fue la primera evidencia observacional de la existencia de la radiación gravitacional; que si detectada directamente lejos de la fuente, se comportaría como una onda.

C. Detectores de ondas gravitacionales

¿Cómo es que las ondas gravitacionales afectan a nuestro entorno?

Supongamos tres objetos que están suspendidos del techo de una habitación como indica la figura 2.

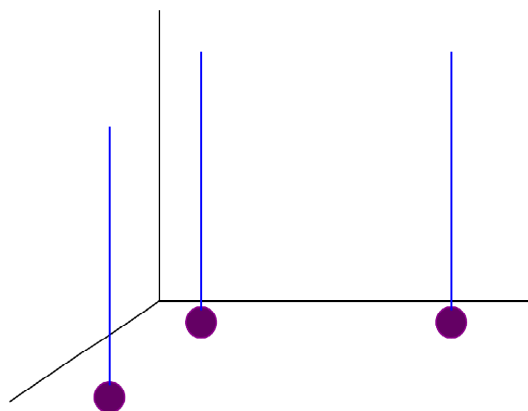


FIGURA 2. Esquema de tres objetos suspendidos, acomodados en los extremos de una L.

Al pasar una onda gravitacional en la dirección del eje vertical, producirá una variación relativa de las distancias entre los objetos; de tal forma que cuando un par de los objetos, sobre uno de los brazos, se acerca, el otro par de objetos, sobre el otro brazo, se aleja; alternándose este movimiento entre un par y el otro. La onda también podría pasar en cualquier otro ángulo que no sea la dirección vertical, pero entonces, para la misma amplitud de la onda, el efecto sobre los objetos suspendidos será menor.

Dado que las señales de las ondas gravitacionales son tan débiles, se necesita de artefactos elaborados para poder detectarlas. Existen varias construcciones, en diversos países, dedicadas a la detección de ondas gravitacionales; fundamentalmente hacen uso de las técnicas de interferometría para obtener mediciones precisas. El efecto que produce una onda gravitacional cuando pasa es achicar unas distancias y estirar otras. Por esto los detectores intentan medir las distancias relativas entre cuerpos de referencia. La idea en estos detectores es medir las distancias entre espejos, por medio de técnicas interferométricas de láseres que rebotan entre los mismos. La configuración usual es una construcción en forma de L, con espejos en los extremos y en el ángulo, como muestra la figura 3. Al combinar los haces de luz de los dos brazos se produce un patrón de interferencia con lo que se intenta medir la variación de la distancia relativa entre los espejos, provocada por el paso de una onda gravitacional.

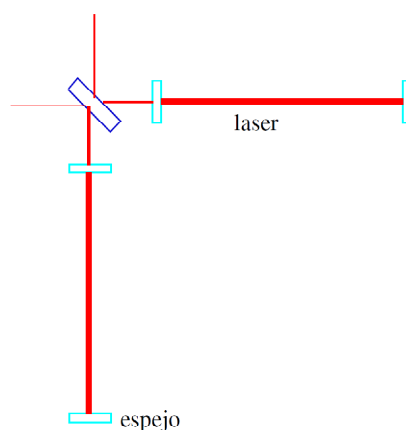


FIGURA 3. Esquema de un detector interferométrico. En los extremos de dos brazos en forma de L se suspenden espejos. Un láser es inyectado en el sistema que lo separa para que se refleje en los dos brazos de la construcción en forma de L. Por métodos de interferometría se desea medir las variaciones de las distancias relativas entre los espejos, comparando la longitud de los brazos.

A la fecha se han construido varios observatorios gravitacionales interferométricos que serían capaces de detectar radiación gravitacional proveniente de algunos sistemas astrofísicos particulares.



FIGURA 4. Interior del detector VIRGO de 3km de lado, cerca de Pisa, Italia.

II. LA RELATIVIDAD GENERAL

Las ondas gravitacionales se entienden dentro del marco teórico de la relatividad general, por lo que es apropiado hacer una breve referencia a la temática.

A. Antecedentes históricos

Vale la pena enfatizar que la diferencia fundamental entre la mecánica newtoniana y la visión de la *relatividad especial* en la estructura del espacio-tiempo es que, mientras en la imagen newtoniana todas las perturbaciones son instantáneamente detectadas por el resto del Universo, en la visión de la relatividad especial aparece una velocidad máxima para la transmisión de información. En relación con esto hemos indicado anteriormente (Moreschi, 2000) que las transformaciones de Lorentz se pueden deducir del principio de la relatividad y de la suposición de una velocidad finita máxima para la propagación de información.

A principios del siglo XX la situación era que la cinemática de partículas y la electrodinámica imponían la existencia de una estructura matemática nueva para el marco teórico de la relatividad especial, que era distinta a la estructura del marco teórico de la física galileana-newtoniana. Mientras en la relatividad especial se usan las transformaciones de Lorentz para relacionar sistemas inerciales con velocidad relativa, en el marco teórico de la física galileana-newtoniana se usan las llamadas transformaciones de Galileo. Esto implica que la descripción newtoniana de la gravitación es incompatible con el marco teórico relativista. Por lo tanto, era clara la necesidad de una nueva teoría de la gravitación que no contradijese el resto de las ideas físicas.

La teoría de la relatividad general es la teoría de la gravitación que resolvió este dilema y contiene un cambio dramático en la noción del espacio-tiempo con respecto al punto de vista proveniente de la mecánica newtoniana y aun de la relatividad especial.

Para tener una idea clara de la naturaleza de los nuevos conceptos que fueron introducidos, es conveniente evocar algunos de los pensamientos originales que dieron nacimiento a esta teoría.

B. El principio de equivalencia

En 1911, cinco años antes de la presentación de la teoría de la relatividad general, A. Einstein publicó un artículo con el título “Sobre la influencia de la gravitación en la propagación de la luz” (Einstein, 1952). En ese artículo explica una hipótesis sobre la naturaleza física del campo gravitatorio, mediante la siguiente situación física: asumamos un campo gravitatorio homogéneo, con aceleración de la gravedad g ; donde uno puede definir un sistema de coordenadas estacionario K de tal forma que la aceleración gravitatoria apunta en la dirección negativa del eje z . Consideremos otra situación en la cual no hay campo gravitatorio y un sistema K' se está moviendo con aceleración uniforme g en la dirección positiva del eje z de un sistema inercial. Las trayectorias de los puntos materiales en los sistemas K y K' estarán gobernadas por una aceleración negativa g en la dirección del eje z .

Es importante enfatizar que estas ecuaciones se aplican a situaciones físicas que aparentan ser diferentes. Sin embargo, uno obtiene una explicación satisfactoria del experimento de Galileo, correspondiente a la igual caída de distintos objetos en el campo gravitatorio, si se asume que los sistemas K y K' son físicamente equivalentes; en otras palabras, si la aceleración gravitatoria g se entiende equivalentemente como producida por la aceleración del sistema K .

La equivalencia entre los sistemas K y K' es ciertamente válida si uno se restringe a procesos puramente mecánicos donde es aplicable la descripción newtoniana. Sin embargo uno arriba a la formulación de un nuevo principio, el llamado principio de equivalencia, si se asume la equivalencia física de los sistemas K y K' con respecto a todos los procesos físicos. Este principio es muy poderoso y es el fundamento de la relatividad general.

Las consideraciones anteriores se refieren a un campo gravitatorio estático y uniforme, que corresponde a una idealización extrema de un sistema gravitatorio. Sin embargo, todo campo gravitatorio regular cuando es observado en una vecindad muy pequeña de un punto en el espacio-tiempo se asemeja cada vez más a un campo gravitatorio estático y uniforme. Es por ello que se espera que las consideraciones anteriores sean aplicables a una región muy pequeña en un campo gravitatorio arbitrario. Es por eso que el principio de equivalencia se puede presentar de la siguiente forma:

No se puede distinguir por medio de observaciones locales entre un sistema de referencia en presencia de un campo gravitatorio y un sistema de referencia que esta apropiadamente acelerado con respecto a un sistema inercial local (Moreschi, 2000).

Como ejemplo de las implicaciones de este principio, pensemos en la situación en que uno está en presencia de una aceleración gravitatoria constante g y se tira un rayo de luz perpendicularmente a dicha aceleración. Como el sistema físico es equivalente a lo que mediría un observador que esta acelerado con aceleración g respecto de un sistema inercial, se deduce que dicho observador verá, en su sistema de referencia, que el rayo de luz sigue una línea curva, doblándose en la dirección de la aceleración gravitatoria. Debido a la equivalencia de las dos situaciones físicas, implicada por el principio de equivalencia, se deduce que los rayos de luz se curvarán en presencia de campos gravitatorios.

Así, toda la física es afectada por los fenómenos gravitatorios, pues se concluye que la gravitación afecta la geometría del espacio-tiempo. En particular se deduce que los efectos gravitatorios están asociados a la curvatura del espacio-tiempo.

Las ondas gravitacionales que tratamos en este artículo son perturbaciones de esta curvatura.

C. Los agujeros negros

En el marco teórico de la relatividad general aparecen nuevas situaciones y conceptos, como por ejemplo, el de agujero negro.

Una manera de entender la noción de agujero negro es asociar la definición de velocidad de escape de un cuerpo y la existencia de la velocidad máxima. Si estamos en la superficie de un cuerpo celeste, como un planeta y se arroja una partícula hacia arriba, la misma probablemente caerá nuevamente en la superficie, como se indica en la figura 5. La velocidad de escape de un cuerpo celeste, o de un planeta, se define como la velocidad que debe tener una partícula para poder alejarse indefinidamente de la superficie del planeta. Así para cada cuerpo celeste de radio r y masa M se puede calcular su velocidad de escape. Ahora pensemos en la situación en que manteniendo constante la masa del planeta, hacemos disminuir su tamaño, de tal forma que la superficie del mismo cada vez tiene radios r menores. Sucede que a medida que se disminuye el radio del planeta, le velocidad de escape aumenta. Pero como hay una velocidad máxima de las interacciones, y por lo tanto también para las partículas, llegará un momento, disminuyendo el tamaño del planeta ficticio, en que la velocidad de escape alcanzará el valor de esta velocidad máxima. En esa situación, nada podrá escapar de dicha superficie, ni siquiera la luz, por lo que a un cuerpo tal se lo llama agujero negro.

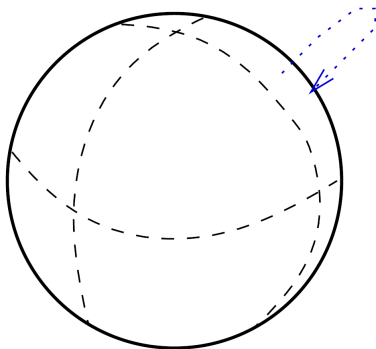


FIGURA 5. Se tira un objeto con una velocidad inicial alcanzando una distancia máxima desde el centro de la Tierra.

A cada masa le corresponde un radio tal que si tiene ese tamaño su velocidad de escape es c .

El radio de un agujero negro con la masa del Sol será de aproximadamente 3km; mientras que el radio de un agujero negro con la masa de la Tierra será de aproximadamente 9 milímetros.

El autor realiza sus actividades de investigación, en FaMAF e IFEG, en el Grupo de Relatividad y Gravitación, en varios temas de la relatividad general. Uno de ellos es el cálculo de las ecuaciones de movimiento de agujeros negros con el objeto de poder describir las señales de las ondas gravitacionales que se producen por sistemas binarios u otros sistemas astrofísicos.

III. LOS DETECTORES DE LA PRIMERA SEÑAL

En febrero de este año se anunció (Abbott y otros, 2016) la primera detección de ondas gravitacionales, llevada a cabo por los observatorios LIGO ubicado uno en Hanford, estado de Washington, y el otro en Livingston, estado de Luisiana, en Estados Unidos. Estos observatorios están separados por una distancia aproximada de 3000 km. La detección corresponde a un evento observado el 14 de septiembre de 2015 a las 09:45:45 UTC. A este evento se lo denomina GW150914.

Los observatorios LIGO son los más grandes construidos al momento. En la foto de la figura en 6 se muestra la parte central de la construcción de LIGO en Livingston; que tiene dos brazos de 4km de largo cada uno.



FIGURA 6. Parte central del detector LIGO de 4km de lado, en Livingston, estado de Luisiana, Estados Unidos.

En la foto satelital de la figura 7 se muestra la construcción del observatorio LIGO ubicado en Hanford.

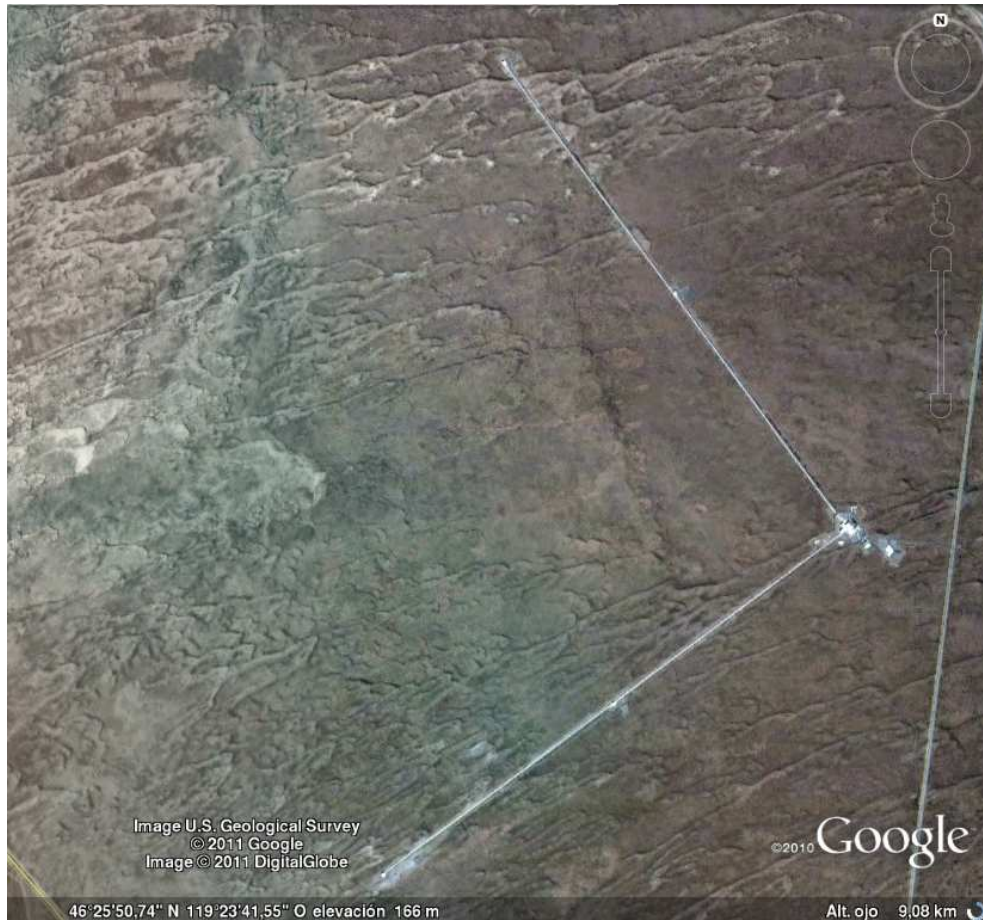


FIGURA 7. Detector en Hanford, estado de Washington, en el oeste de Estados Unidos.

La foto satelital de la figura 8 muestra la construcción del observatorio LIGO situado en Livingston.

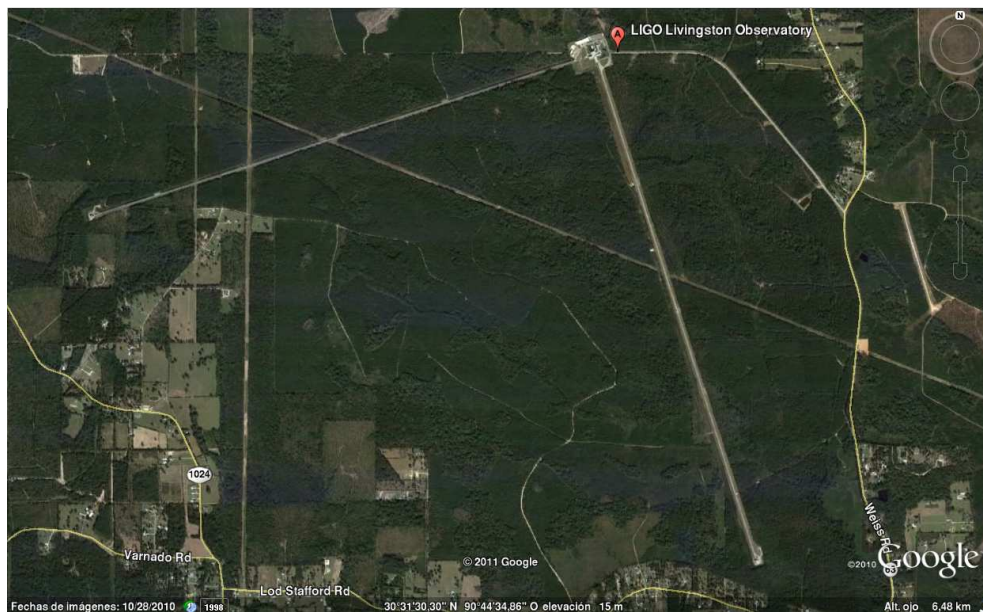


FIGURA 8. Detector en Livingston, estado de Luisiana, en el sureste de Estados Unidos.

Mientras el observatorio de Hanford está ubicado en la zona noroeste de Estados Unidos, el de Livingston está ubicado en la zona sudeste del país; como se puede ver por las marcas amarillas señaladas en la figura 9.

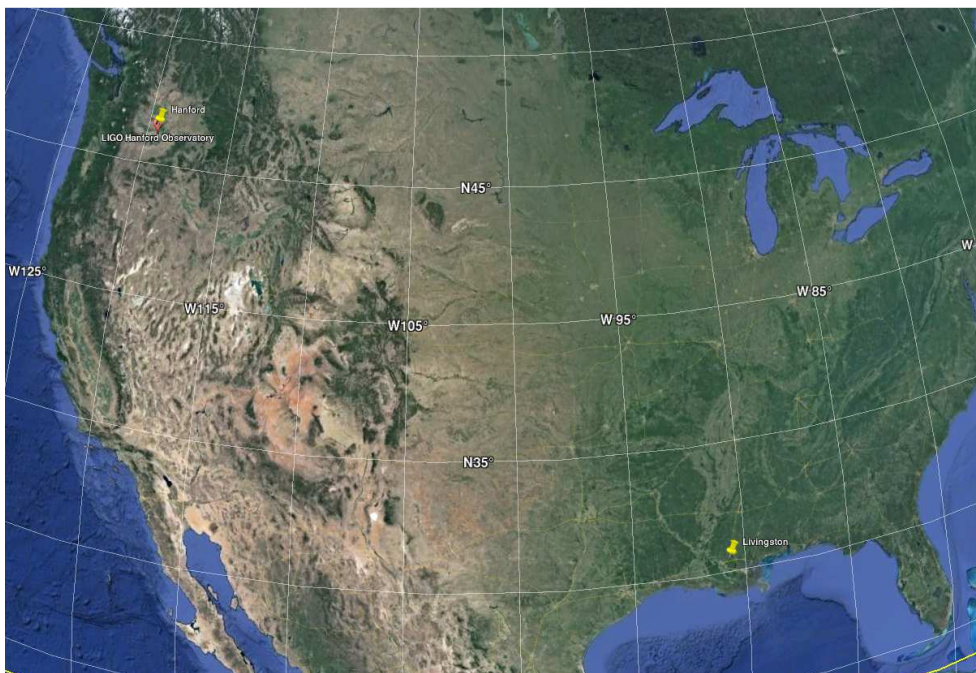


FIGURA 9. Orientación, respecto de la superficie de la Tierra.

Cada brazo de estos observatorios contiene un tubo al vacío por donde viaja la luz láser que rebota en los espejos ubicados en sus extremos. Los espejos están sostenidos por sofisticados mecanismos de suspensión que están diseñados para disminuir, tanto como se pueda, las vibraciones sísmicas. Los láseres usados son de los más potentes construidos y también de los más estables. Estos observatorios son el resultado de décadas de desarrollo tecnológico llevado a cabo para este fin específico. Su descripción detallada está fuera de nuestro objetivo, dado que nos queremos concentrar en el fenómeno de la primera detección de ondas gravitacionales.

IV. LA SEÑAL

Afortunadamente la gente de LIGO, no solo ha puesto en el dominio público los datos de la observación de GW150914, sino que también ha publicado en su página web rutinas que permiten hacer análisis espectral de la señal y manejo de la misma. En lo que sigue presentamos un estudio preliminar que hemos hecho de la señal detectada; aunque seguimos estudiando en detalle la misma dado que es un tema central de nuestras investigaciones.

En la figura 10 hemos graficado la señal cruda publicada por LIGO con una extensión total de 32 segundos, alrededor del evento detectado; que se ubicaría aproximadamente al medio del gráfico.

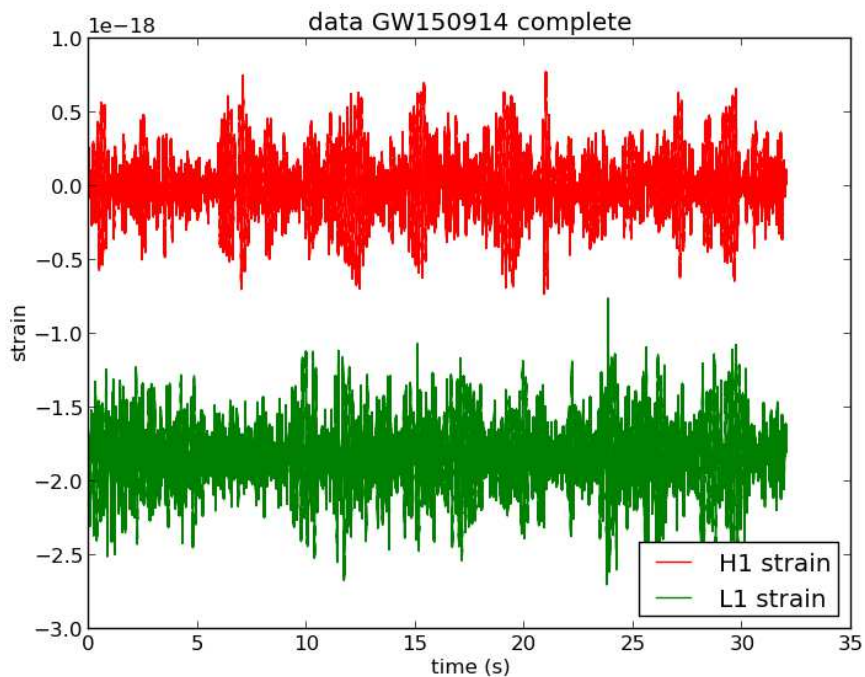


FIGURA 10. Señal original de LIGO Hanford y Livingston de 32 segundos.

En la figura 11 mostramos el gráfico de los datos crudos con una extensión total de 10 segundos alrededor del evento GW150914.

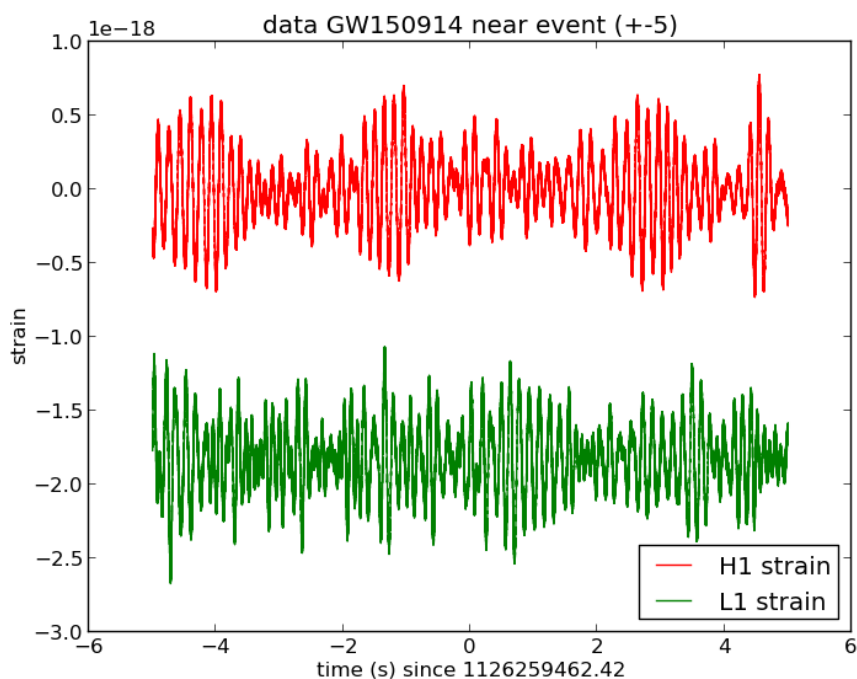


FIGURA 11. Señal original de LIGO Hanford y Livingston de ± 5 segundos cercanos al evento.

En la figura 12 mostramos el gráfico de los datos crudos del evento GW150914 con una extensión total de 2 segundos.

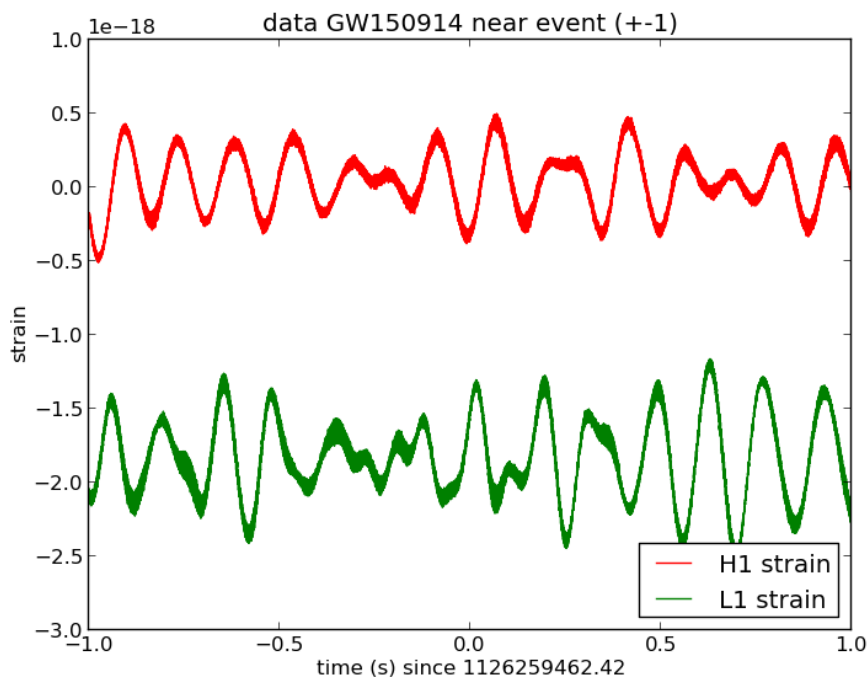


FIGURA 12. Señal original de LIGO Hanford y Livingston de ± 1 segundo cercanos al evento.

Ninguna de estas señales, que se muestran ondulantes, constituye la famosa señal del evento GW150914 que corresponde a la detección de las ondas gravitacionales. Para poder llegar a ella debemos hacer un estudio más detallado, dado que la señal es muy débil y está enmascarada por señales inherentes al propio observatorio, que tienen que ver con frecuencias características de su diseño. Pero, ¿cómo es que podemos estar seguros que realmente se detectó una señal tan débil, en medio de tanto ruido?

Una manera de ver esto es viendo a la señal por medio de espectrogramas. Sucede que la señal se puede entender que está contenida en un determinado rango de frecuencias. Una curiosidad es que dicho rango está dentro del rango de frecuencias sonoras que sentimos con nuestros oídos, por lo que es posible transformar la señal detectada en sonidos audibles. No solo eso, también le podemos aplicar las técnicas que se usan habitualmente para el estudio de señales audibles, como son los espectrogramas. En la figura 13 mostramos el espectrograma correspondiente a la señal del observatorio de Hanford, pero restringido a frecuencias menores a 1000Hz, o sea 1000 ciclos por segundo.

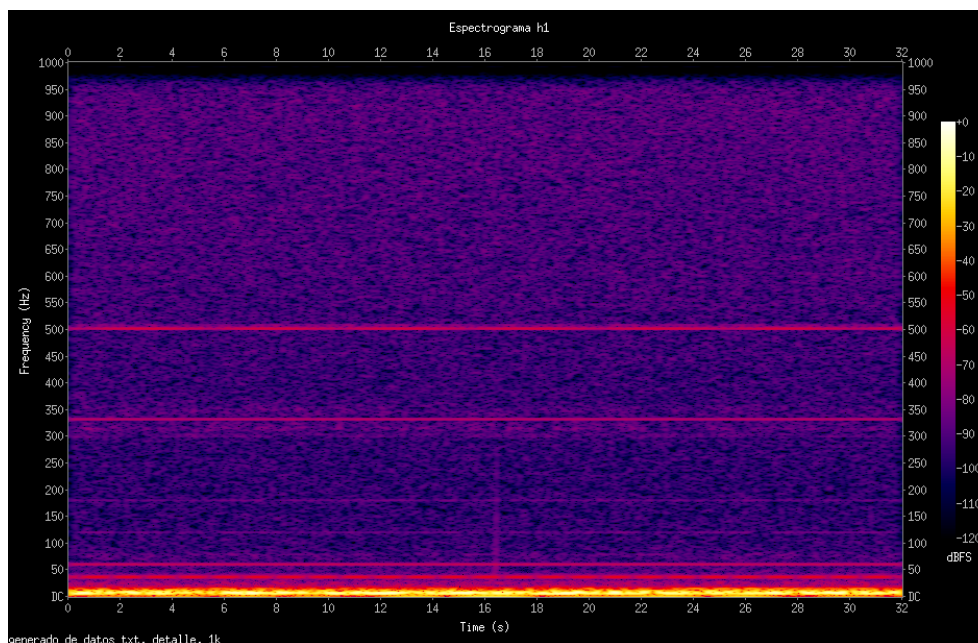


FIGURA 13. Espectrograma de LIGO Hanford de 32 segundos, detalle.

Se observa en este gráfico algunas líneas horizontales, que corresponden a frecuencias características del observatorio; pero también se puede ver una tenue línea vertical en la parte central e inferior. Esto corresponde a una señal que contiene frecuencias hasta unos 300Hz y que ocurrió en una fracción de segundo.

Si esto hubiese ocurrido solo en un detector, entonces se hubiese descartado como una señal espuria. Pero lo interesante es que se observó en los dos detectores. En la figura 14 mostramos el espectrograma correspondiente a la señal (en estéreo) del observatorio de Hanford, en la parte superior, y del observatorio de Livingston en la parte inferior.

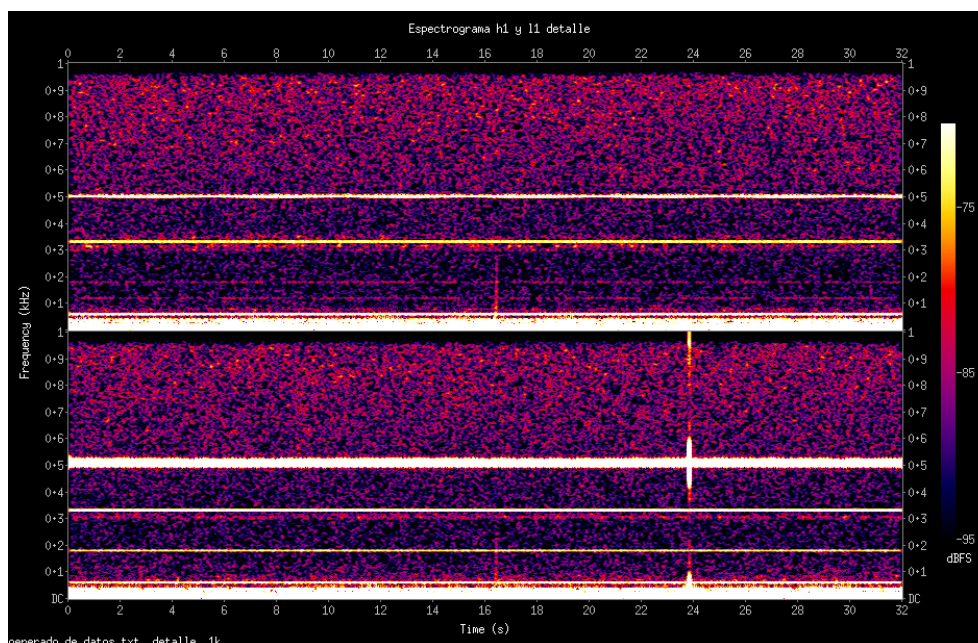


FIGURA 14. Espectrograma estéreo de LIGO Hanford y Livingston de 32 segundos, detalle. La señal que aparece alrededor del segundo 24 en el espectrograma de Livingston es espuria, por lo que no representa una señal astrofísica.

Se puede ver que la tenue señal vertical aparece en los dos espectrogramas, ocurriendo aproximadamente al mismo tiempo. Esta es una indicación de que es una señal ajena a los ruidos característicos de los observatorios y nos invita a que prestemos más atención a este evento.

V. ANÁLISIS MÁS DETALLADO DE LA SEÑAL

Para poder distinguir la señal es necesario hacer un filtrado de ruidos y frecuencias propias del detector. En la figura 15 mostramos el gráfico de la señal de los dos detectores luego de que le aplicamos un llamado blanqueo y además un filtrado, permitiendo solo frecuencias de entre 10 y 700Hz. Además se invirtió la señal de Hanford y se ajustó un desfase temporal a la señal de Livingston en 7,5 milisegundos para que coincida mejor con la del otro detector.

El ajuste de desfase está relacionado al hecho de que la señal llegó al detector de Livingston unos milisegundos antes que al de Hanford, por lo que para graficar las dos señales superpuestas se debe realizar ese ajuste de traslado temporal. Notar que el gráfico va de -0,10 segundos a 0,05 segundos alrededor del tiempo del evento.

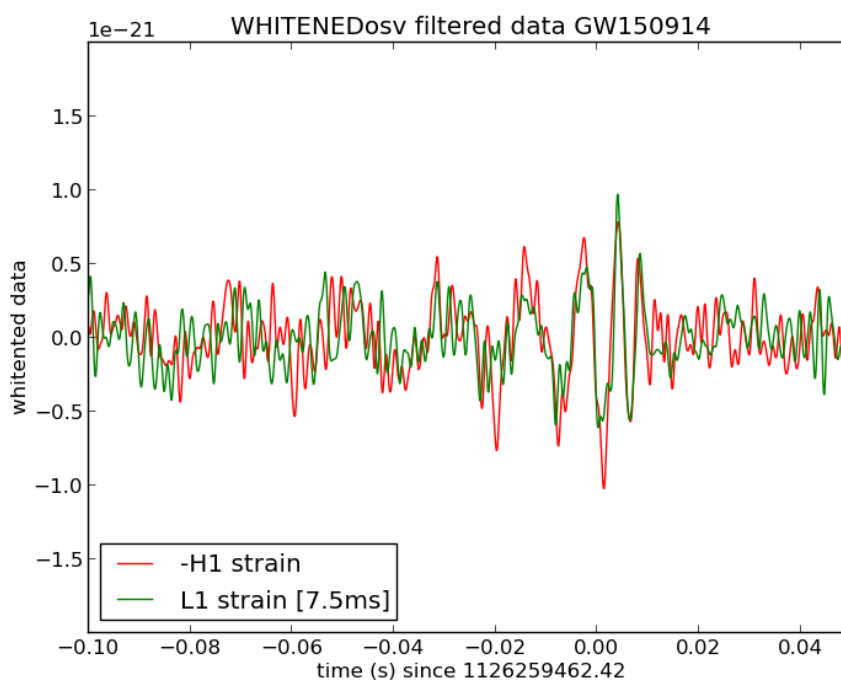


FIGURA 15. Gráfico de la señal en la ventana [-0.1s,0.05s] cerca del evento, filtrada. Filtro de 10 a 700Hz. Con corrimiento temporal de 0,0075 segundos.

En la figura 16 hemos promediado las dos señales y hemos añadido el resultado del cálculo numérico publicado, donde hemos realizado el ajuste para que el pico superior coincida.

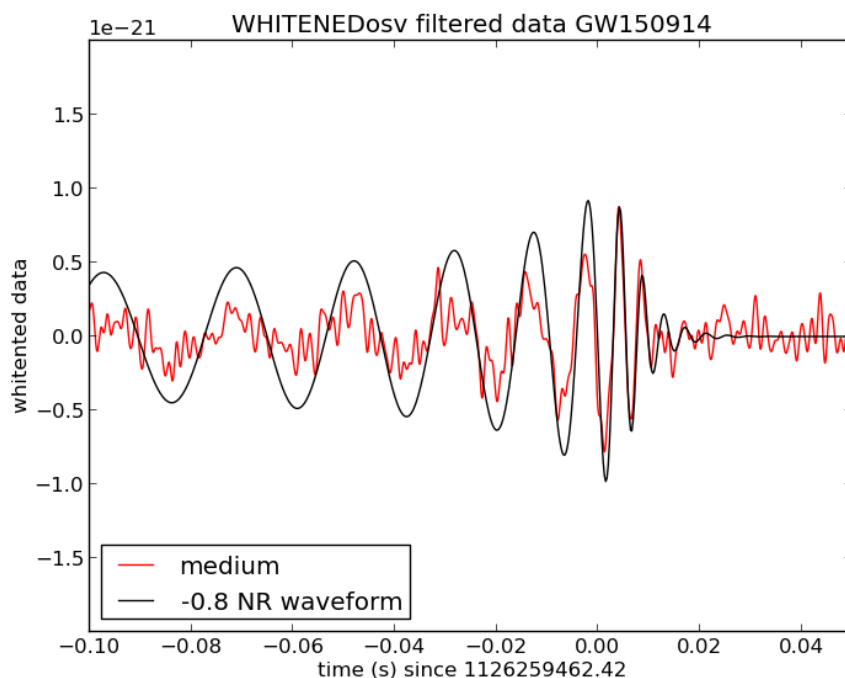


FIGURA 16. Gráfico de la señal en la ventana [-0.1s,0.05s] cerca del evento, filtrada. Filtro de 10 a 700Hz. Señal promediada se muestra en rojo y cálculo numérico en negro.

VI. ASTROFÍSICA DE LAS ONDAS GRAVITACIONALES

Los primeros cálculos que se han realizado para describir la señal detectada del evento GW150914, indican que correspondería a un sistema binario compuesto por dos agujeros negros. Uno con una masa de 29 masas solares y el otro con 36 masas solares. La distancia estimada a este sistema es de 410 mega parsecs; lo que equivale a un 10 por ciento de la distancia máxima cósmica observable.

La señal corresponde a la coalescencia del sistema en sus últimos instantes; quedando al final un único agujero negro de unas 62 masas solares. Se estima que una gran cantidad de energía se irradió en forma de ondas gravitacionales.

La figura 17 muestra distintas estimaciones, hechas con la señal, de la dirección en la esfera celeste de donde podría provenir la misma. Tomar en cuenta que el desfasaje temporal de la señal daría la información de un cono partiendo de la Tierra; por lo que su intersección con la esfera celeste dará un círculo; como más o menos se muestra en 17. El problema de calcular la dirección es tan complicado que existe más de una forma de hacer estimaciones y llevar a cabo dicho cálculo; por eso se muestra más de un gráfico.

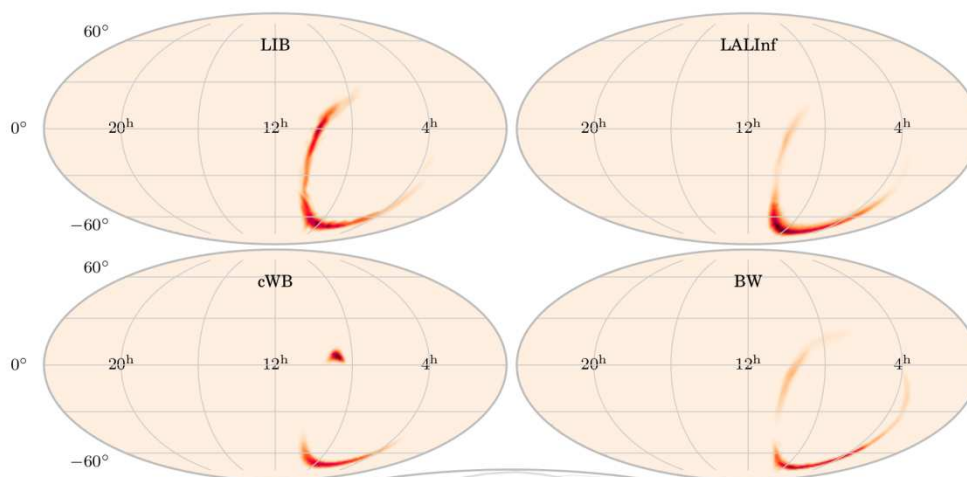


FIGURA 17. Direcciones en el cielo de donde podría provenir la señal.

VII. COMENTARIOS FINALES

Varias especies que se han desarrollado en nuestro planeta, incluida la nuestra, tienen la posibilidad de detectar la luz. En particular, nuestros ojos se han adaptado a distinguir con mayor precisión las frecuencias de luz para las cuales la radiación solar es mayor en la superficie de la Tierra. Es por ello que no existe en nuestra historia una fecha que podamos asociar a la primera detección de ondas electromagnéticas; dado que nuestra especie las detecta desde nuestros orígenes. En cambio sí tenemos una fecha para la primera detección de ondas gravitacionales: fue el 14 de septiembre de 2015. Esa fue la primera vez que nuestra especie detectó ondas asociadas a otro tipo de interacción, la gravitatoria.

Esto marca un hito en nuestra historia. A partir de ese día comenzamos a 'ver' al Universo por medio de otros ojos. La posibilidad de obtener información de objetos y sistemas astrofísicos por medio de la radiación gravitacional abre un nuevo panorama, donde sus implicaciones solo podrán ser entendidas a lo largo del tiempo y son inimaginables en el presente. En la medida en que vayamos obteniendo más y más información por medio de estas nuevas detecciones, tendremos la posibilidad de ir completando nuestra imagen del Universo en el que vivimos.

REFERENCIAS

- Abbott y otros. (2016). The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries. *Physical review letters*, 116(13), p. 131103. arXiv:1602.03837.
- Einstein, A. (1952). On the influence of gravitation on the propagation of light. En Lorentz y otros (Eds) *The Principle of Relativity*. New York: Dover pub. Inc. Traducido de: Uber den Einuss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes, *Annalen der Physik*, 35, 1911.
- Gleiser, R., Kozameh, C. y Moreschi, O. (1992). General Relativity and Gravitation 1992, Actas del *Thirteenth INT Conference on General Relativity and Gravitation*, 28 June - July 4, Córdoba, Argentina.
- Hulse, R. A. y Taylor, J. H. (1975). Discovery of a pulsar in a binary system. *Neutron stars, black holes, and binary X-ray sources*, 48, p. 433.
- Moreschi, O. M. (2000). *Fundamentos de la mecánica de sistemas de partículas*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.