



# XXI Olimpiada Iberoamericana de Física

26 - 30 Setiembre 2016, Carmelo, Uruguay



## PRUEBA TEÓRICA

### Problema N° 1

#### El LIGO y el año de las Ondas Gravitacionales (y su centenario).

Entre 1915 y 1916, Albert Einstein concluyó su Teoría General de la Relatividad (RG) en una serie de artículos que cambiaron el concepto newtoniano de espacio, tiempo y gravitación. La ecuación del campo gravitacional de la RG expresa que la masa y la energía modifican la geometría del espacio-tiempo. En palabras del gran físico John Wheeler:



*"La materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse.  
El espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse."*

Entre otras cosas, la RG predice la existencia de fenómenos tan exóticos como los agujeros negros y las ondas gravitacionales. Los agujeros negros son objetos masivos que curvan el espacio-tiempo de tal modo que ni la luz puede escapar de ellos. Las ondas gravitacionales, son oscilaciones del espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz. El paso de una onda gravitacional modifica el espacio-tiempo de tal modo que la distancia  $L$ , entre dos puntos se ve modificada en una cantidad  $\Delta L$ . La *deformación (strain)*  $h$ , de una onda gravitacional se define como el cociente entre ambas,

$$h = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

En general estas ondas son extremadamente débiles, a menos que las masas y las aceleraciones involucradas sean extremadamente altas. Los candidatos a fuentes de ondas gravitacionales observables son algunos fenómenos astronómicos extraordinarios, como por ejemplo un sistema de estrellas binarias muy próximas rotando una respecto de otra. Aun así las ondas generadas son tan débiles que por mucho tiempo se dudó acerca de la posibilidad de su detección directa. Según la RG, la potencia  $P$  emitida en forma de ondas gravitacionales por un sistema binario es aproximadamente,

$$P \approx \frac{c^3}{G} (\pi h f r)^2 \quad (2)$$

donde  $h$  es la deformación a una distancia  $r$  de la fuente y  $f$  es la frecuencia de la señal detectada.  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$  es la constante de gravitación universal y  $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$  es la velocidad de la luz.

Sin embargo, la observación directa de ondas gravitacionales era un desafío que requería logros tecnológicos excepcionales. Ronald Drever, Rainer Weiss y Kip Thorne se cuentan entre los primeros científicos en proponer la detección de ondas gravitacionales mediante interferometría, lo cual constituye la base del Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser: LIGO.

El proyecto cuenta actualmente con dos observatorios, **LIGO Hanford** y **LIGO Livingston**, **distanciados 3002 km**, uno de otro. Estos observatorios a menudo se comparan a gigantescos “micrófonos”, pues permiten detectar las vibraciones gravitacionales del espacio-tiempo, de modo análogo a como un micrófono permite detectar las vibraciones de las ondas sonoras.

Cada observatorio está compuesto por dos brazos perpendiculares entre sí, de **4,0 km de longitud** cada uno. El efecto de una onda gravitacional es reducir las distancias en una dirección y simultáneamente aumentarlas en la dirección perpendicular. Es decir que cuando una onda gravitacional pasa a través del interferómetro, la longitud de los brazos oscila con la misma frecuencia de la onda gravitacional de tal modo que cuando un brazo se acorta el otro se estira y viceversa. Para medir la deformación producida por una onda gravitacional se utiliza un sistema constituido principalmente por un láser y varios espejos (Fig. 1). Para reducir las vibraciones producidas por el entorno, los espejos se encuentran colgando de un sofisticado sistema tipo péndulo.

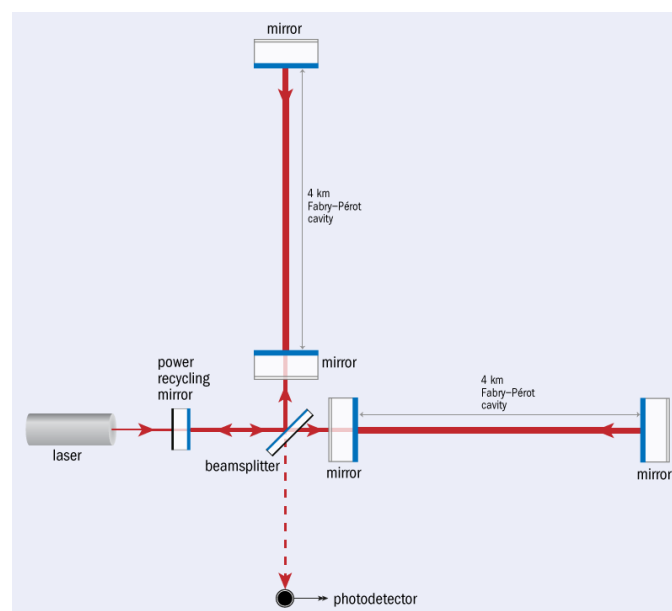


Fig. 1 - Esquema del interferómetro

Luego de una actualización (Advanced LIGO) culminada en agosto de 2015, LIGO tuvo su gran día el 14 de setiembre de 2015, cuando se observó una onda gravitacional por primera vez en la historia, justo a tiempo para “celebrar” los 100 años de la predicción teórica realizada por Einstein.

La señal detectada en uno de los observatorios se muestra en la Fig. 2. **La onda gravitacional fue detectada primero en LIGO Livingston y 6,9 ms más tarde en LIGO Hanford.**

El análisis de esta señal permitió concluir que las ondas gravitacionales observadas eran compatibles con las ondas generadas por el colapso de un sistema binario de agujeros negros con masas aproximadas,  $m_A=35 M_S$  y  $m_B=30 M_S$ , donde  $M_S=2,0 \times 10^{30}$  kg es la masa del Sol. A este evento se lo denominó GW150914 (Gravitational Wave 2015 September 14).

El descubrimiento fue anunciado públicamente el 11 de febrero de 2016, junto con la publicación del artículo científico correspondiente en la revista Physical Review Letters, inaugurando así la nueva era de la astronomía de ondas gravitacionales.

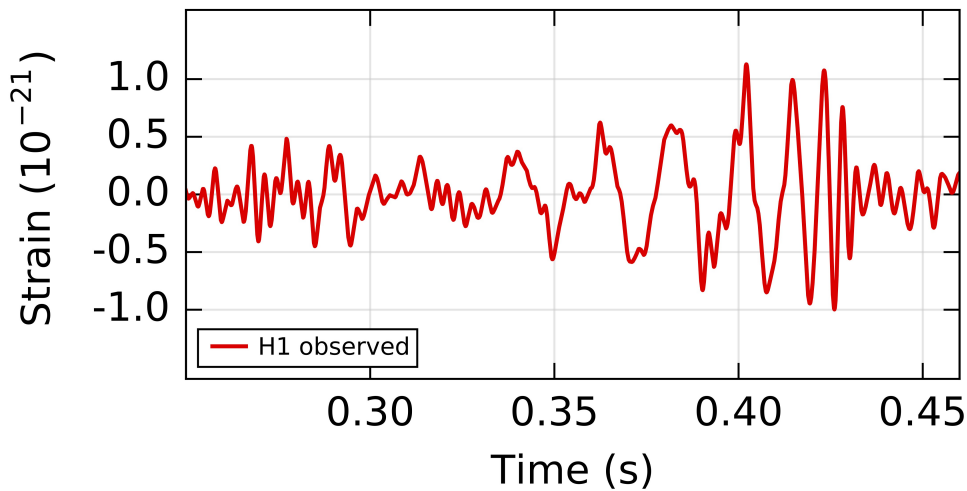


Fig. 2 - Señales detectadas en ambos observatorios LIGO. Deformación (strain)  $h$  en función del tiempo  $t$ .

En este problema exploraremos algunos aspectos de la física del evento GW150914.

**PARTE 1. “Escuchando el universo”: Detección de ondas gravitacionales. (2 puntos)**

1a) (0,9 puntos) Para comprender la sensibilidad del LIGO, considere una abeja de 0,1 g de masa, que se encuentra a 10 metros de uno de los espejos del interferómetro. Determine el desplazamiento  $d$  que la abeja produce sobre el espejo por atracción gravitatoria. Para esto considere un modelo simplificado, como si el espejo estuviese suspendido de un hilo de 1,0 m de longitud.

Este tipo de perturbación sobre el instrumento se denomina “ruido newtoniano”.

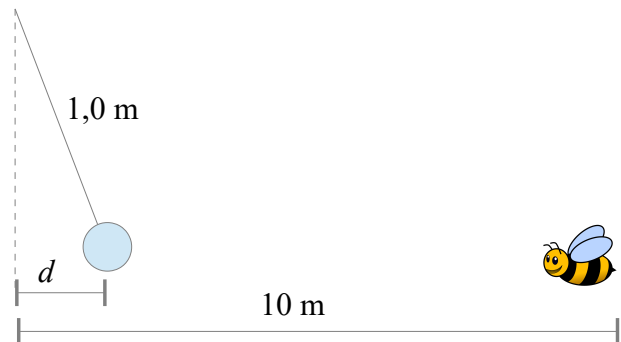


Fig. 3 – Diagrama para la parte 1a.

1b) (0,4 puntos) A partir de la información de la señal observada (Fig. 2), determine el desplazamiento máximo que sufrió el espejo ante el paso de la onda gravitacional y compare esa distancia con la calculada en el punto 1a) y con el orden de magnitud del diámetro de un protón (igual a 1 femtometro).

1c) (0,7 puntos) Determine la dirección de la fuente que originó las ondas gravitacionales. Para esto calcule el ángulo  $\theta$ , que forma la dirección de la fuente con respecto al plano mediatriz del segmento de recta determinado por ambos observatorios. (Observe que con la información disponible solo podemos determinar un arco de la posible posición de la fuente.)

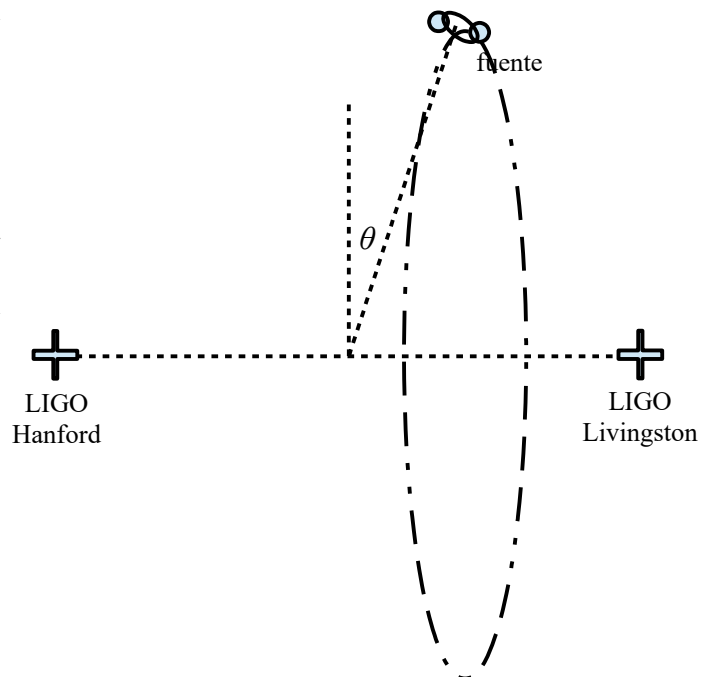


Fig. 4 – Diagrama para la parte 1c (fuera de escala)

**PARTE 2. “Danza cósmica”: Sistemas binarios. (3,5 puntos)**

Un sistema binario está formado por dos estrellas con masas  $m_A$  y  $m_B$ . Cada una se mueve siguiendo un movimiento circular uniforme en torno al centro de masas del sistema. La distancia entre ambas estrellas es  $a$ . Considere un modelo newtoniano, sin correcciones relativistas.

- 2a) (1,3 puntos) Determine la frecuencia de rotación del sistema,  $f$ .
- 2b) (0,7 puntos) Determine el módulo de la velocidad de cada estrella,  $v_A$  y  $v_B$ , en función de la distancia  $a$  y las masas  $m_A$  y  $m_B$ .
- 2c) (0,9 puntos) Determine la energía mecánica del sistema,  $E$ , en función de la distancia y las masas.
- 2d) (0,6 puntos) De acuerdo con lo anterior, si por algún mecanismo el sistema pierde energía:
  - 2d1) ¿Qué ocurre con la distancia entre las estrellas, aumenta, disminuye o se conserva?
  - 2d2) ¿Qué ocurre con la frecuencia?
  - 2d3) ¿Qué ocurre con la velocidad?

Justifique sus respuestas

**PARTE 3. “Música de las esferas”: Radiación de ondas gravitacionales. (2,5 puntos)**

De acuerdo con la teoría newtoniana de la gravedad, los sistemas binarios serían estables, es decir que podrían mantenerse perpetuamente en órbita. Por el contrario, de acuerdo con la RG, ciertos sistemas acelerados emiten ondas gravitacionales (de manera similar a como las cargas eléctricas aceleradas emiten ondas electromagnéticas). Esto significa que los sistemas binarios no son estables pues, debido a la emisión de radiación gravitacional, el sistema pierde energía y consecuentemente la distancia entre los cuerpos disminuye. Este proceso se puede estudiar con una buena aproximación utilizando física newtoniana hasta que el sistema alcanza la llamada *mínima distancia de órbita estable* (ISCO = innermost stable circular orbit).

Según la RG, esta distancia orbital es  $a_{ISCO} = \frac{6GM}{c^2}$ , donde  $M$  es la masa total del sistema.

Una vez que se alcanza esta distancia, los cuerpos comienzan a "caer" de forma precipitada uno hacia el otro y es necesario utilizar las ecuaciones completas de la RG (y supercomputadoras) para predecir su movimiento exacto.

Finalmente los objetos colisionan y si se trata de objetos compactos (estrellas de neutrones, agujeros negros) terminan fusionándose para formar un objeto.

Suponga que en  $t=0$  los agujeros negros están muy alejados, de tal modo que la energía mecánica del sistema es prácticamente nula,  $E_0=0$ . Al interactuar gravitatoriamente, comienzan a orbitar en torno al centro de masas. Mediante el mecanismo de radiación gravitacional el sistema pierde energía de modo que en  $t=t_{ISCO}$  la distancia entre los agujeros negros es  $a=a_{ISCO}$ .

Para los agujeros negros correspondientes al evento GW150914, en  $t=t_{ISCO}$ :

- 3a) (0,7 puntos) Determine la distancia entre los agujeros negros.
- 3b) (0,6 puntos) Determine la frecuencia de rotación del sistema.
- 3c) (0,6 puntos) Determine el módulo de la velocidad de cada agujero negro.
- 3d) (0,6 puntos) Determine la energía gravitacional liberada por el sistema entre  $t=0$  y  $t=t_{ISCO}$ .

#### PARTE 4. "Conclusión": Colapso y defecto de masa. (2 puntos)

Después de  $t=t_{ISCO}$ , el sistema binario colapsó rápidamente y los agujeros negros se fusionaron para formar un único agujero negro de masa  $m=62 M_S$  en tan solo 20 ms.

4a) (0,7 puntos) Determine la potencia con la que emitió el sistema durante esos 20 ms. Exprese esa potencia como un múltiplo de la luminosidad del Sol ( $L_S=3,85 \times 10^{26}$  W).

4b) (1,3 puntos) A partir de la potencia calculada y de la amplitud de la señal detectada (Fig. 2), estime la distancia en años luz a la que se encontraba el sistema binario que generó las ondas gravitacionales observadas. Según la Fig. 2, la frecuencia de la señal detectada en el momento de máxima amplitud es de, aproximadamente, 150 Hz.