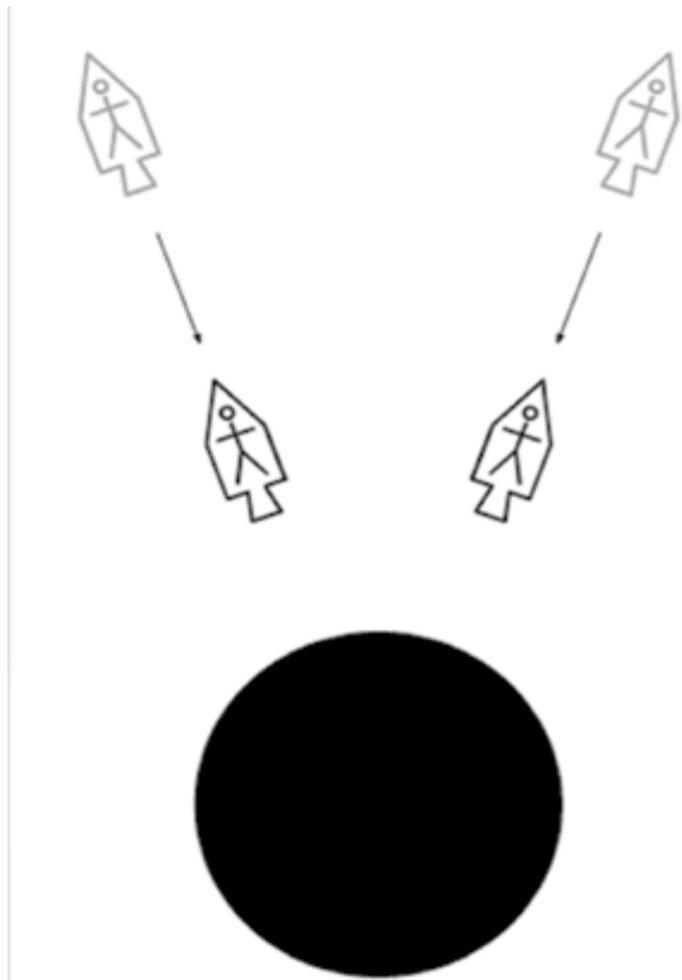


## ¿Qué ondas con la gravedad?



**1. Dos astronautas en caída libre hacia la tierra. A pesar de que ellos no sienten su peso ni perciben movimiento, se acercan uno a otro conforme caen.**

**W. Luis Mochán**  
**Instituto de Ciencias Físicas,**  
**UNAM**  
**Miembro de la Academia de**  
**Ciencias de Morelos**

**E**l jueves 11 de febrero se anunció la detección de ondas gravitacionales producidas por la colisión de dos agujeros negros con masas decenas de veces más grandes que la del sol. Para lograr esto, se midieron las deformaciones del espacio mismo con una precisión enorme, solo lograda con instrumentos que miden miles de metros de extensión pero pueden medir distancias mucho más pequeñas que el tamaño de un núcleo atómico. Esta noticia marca el inicio en una nueva era en la exploración del cosmos.

-¿Te enteraste? La Luna se alejó de la Tierra.

-¡No me digas! ¿Cuándo?

-El 14 de septiembre de 2015, en la madrugada, a las 3:50 con 45 segundos.

-Pues yo la veo como siempre.

-Pues se alejó, se acercó, se volvió a alejar y así sucesivamente durante medio segundo y finalmente regresó a su distancia normal.

-¡No puede ser! La luna no se puede acercar y alejar así como así. Para que la luna vibre tiene que haber una fuerza que la empuje y que la jale. ¿Qué fue lo que produjo dicha fuerza? ¿Cho-

có con un meteorito, explotó un volcán lunar o...?

-Nada. La luna se siguió moviendo en su órbita como si nada.

-Entonces no te entiendo. ¿No dices que se alejó y se acercó?

-Así es, la luna se alejó y se acercó, pero no actuó ninguna fuerza sobre ella, y ella ni se inmutó.

-Lo que me dices es una contradicción. Si la luna no vibró, ¿cómo es que cambió su distancia a la tierra?

-Porque lo que vibró fue el espacio-tiempo.

-No puede ser. ¿No dijo Newton que el espacio es absoluto y permanece similar e inmóvil sin relación a ningún fenómeno externo? ¿Cómo puede vibrar?

-Eso creía Newton, pero gracias al trabajo de Einstein, desde hace un siglo sabemos que el espacio y el tiempo forman una unidad, el espacio-tiempo, y que se puede deformar por la presencia de masas y de energía; en ausencia de fuerzas los cuerpos se propagan libremente a lo largo de sus *geodésicas*, las cuales no necesariamente son rectas.

-Explicame eso.

-Imaginate que conduces una nave espacial y la guías hasta una gran altura de, digamos, 18,000km, donde la atmósfera es inexistente, encima del ecuador, donde frenas, detienes su movimiento, y luego apagas los motores. ¿Qué pasaría después?

-Caerías rumbo a la tierra debido a la acción de la gravedad.

-Lo curioso es que hay una especie de *conspiración cósmica*. Como se dice que demostró Galileo tirando objetos desde la torre de Pisa, en ausencia de perturbaciones como las causadas por la atmósfera, todos los objetos caen con la misma aceleración, independientemente de su composición y su masa.

-¿Y eso qué?

-Que tu caerías con la misma aceleración que tu nave, y por lo tanto flotarías en su interior como si tu peso hubiera desaparecido, como si no hubiera fuerza gravitacional. La *masa inercial*, la resistencia a cambiar el estado de movimiento, es idéntica a la *masa gravitacional*, la propiedad de la materia que se acopla al campo gravitacional para producir el *peso*, y eso permite *eliminar* a la fuerza de gravedad, como en un acto de magia. En cierto sentido, la gravedad es una *fuerza ficticia*, pues la puedes hacer desaparecer, como puedes eliminar la fuerza centrífuga, con sólo cambiar de *sistema de referencia*, es decir, de punto de vista.

-Pues no me convences. Si saltaras de la azotea de un edificio, la gravedad haría que caigas y te rompas la cabeza, lo cual no sería muy ficticio.

-Lo que te rompería la cabeza sería el impacto con el suelo, no la gravedad, y durante tu caída no sentirías más fuerza que la del viento. Lo que es real no es la gravedad, sino *sus cambios*, descritos por la curvatura del espacio-tiempo.

-Ahora entiendo menos. ¿Lo real son los cambios de lo ficticio?

-Déjame volver a tu nave espacial en caída libre con los motores apagados. Localmente, sin asomarte a la distancia, no podrías distinguir tu caída de un estado de perfecta inmovilidad en que no actúe sobre ti fuerza alguna. Si sacaras una moneda de tu bolsillo y la soltaras, esta no caería...

-Claro que sí, caería hacia la tierra.

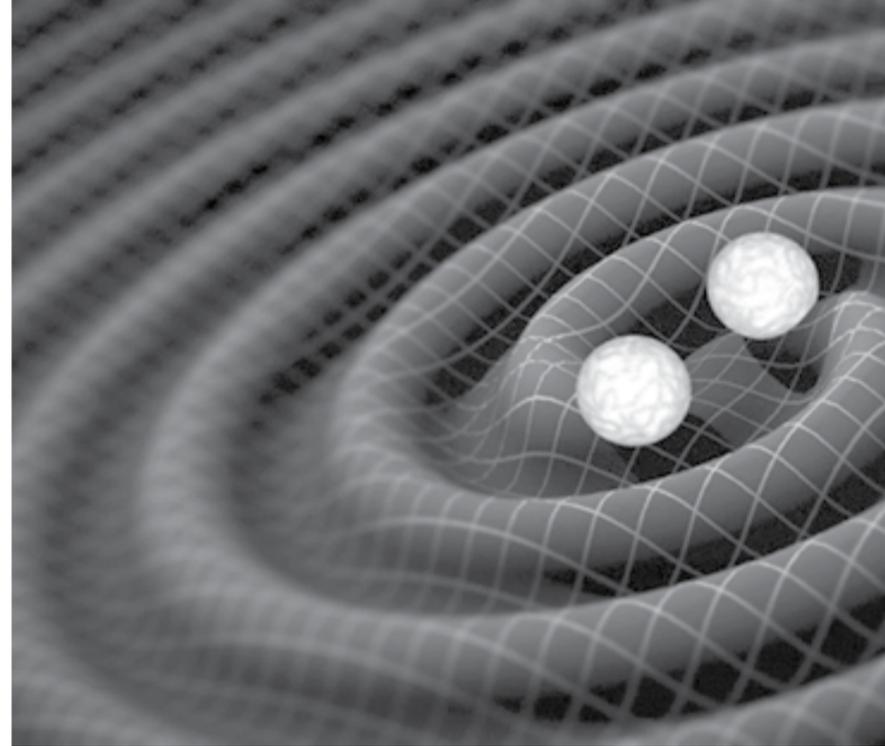
-Pero caería igual que tú, con la misma aceleración, por lo que tú la verías quieta, y si le dieras un pequeño empujón, la verías alejarse de ti a velocidad constante. Imagina ahora a otro astronauta haciendo el mismo experimento, con el motor de su nave apagado y en caída libre pero, digamos, a 100 metros de distancia hacia el oriente de tu posición.

-¿Qué con él?

-Que también estaría en reposo disfrutando de la ingravidez. Pero curiosamente, después de hora y media él se habría acercado a ti y estaría como a unos 50 metros.

-Claro, pero debe ser porque en ese tiempo ambos habríamos caído unos 12,000km hacia el centro de la tierra, la mitad de

TOMADO DE [HTTPS://WWW.LIGO.CALTECH.EDU/MIT](https://www.ligo.caltech.edu/mit)



**2. Dos agujeros negros girando mientras caen uno hacia el otro y emitiendo ondas gravitacionales que distorsionan el espacio por donde se propagan.**

nuestra distancia inicial (ver fig. 1).

-Cierto, pero desde otro punto de vista, ambos han estado quietos, cada uno en reposo dentro de su nave y sin *sentir* fuerza alguna, ni siquiera la de la gravedad, así que podría explicarse lo mismo diciendo que el espacio entre ustedes se encogió mientras Uds. estaban distraídos y descansando. Ese es el efecto *real* de la gravedad, deformar el espacio-tiempo, en este caso por la cercanía de la Tierra. Esto permite explicar la caída libre tal como se ve desde cualquier sistema de referencia.

-¿Y regresando a la luna, a qué se debió que se alejara y acercara?

-A que hace algunos años una pareja de agujeros negros, uno con una masa de alrededor de 29 veces la masa de nuestro sol y el otro con una masa de 36 veces la solar, atrapados cada uno por el campo gravitacional del otro empezaron a caer cada vez más rápido en una vertiginosa ruta espiral hasta que se juntaron en un sólo agujero negro (figura 2). En el proceso, emitieron en forma de ondas gravitacionales una cantidad enorme de energía, equivalente a la que obtendríamos de aniquilar tres soles y convertir toda su masa en energía pura de acuerdo a la famosísima fórmula  $E=mc^2$ . Para que aprecies la enormidad de este evento, considera que en la bomba termonuclear más poderosa estallada en la tierra, de 50 megatones, la cantidad de masa aniquilada fue de apenas poco más de 2kg.

-¿Dónde se dio esa explosión? Yo no vi nada.

-La colisión se dio a unos  $1.2 \times 10^{25}$  m de distancia, es decir, a 12 mil millones de millones de millones de kilómetros. Las ondas producidas en ella se

propagaron a través del espacio durante mil cientos millones de años y apenas hace unos meses pasaron por nuestra querida Tierra.

-¿Cómo sabes eso?

-Hace apenas unos días, el jueves 11 de febrero de 2016, se anunció públicamente el hallazgo por el *Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Laser*, conocido como LIGO por sus siglas en inglés y se publicó el artículo científico que lo describe [ver referencia 1]. Esta es la primera vez que se detectan las ondas gravitacionales que había predicho Einstein en 1916 a partir de la *teoría general de la relatividad*, que había publicado en 1915. Inmediatamente después se anunció que el monitor de ráfagas de rayos gamma (GBM) instalado en el telescopio espacial *Fermi* había observado al mismo tiempo un intenso bombardeo de rayos gamma [referencia 2].

-¿Pero qué son las ondas gravitacionales?

-Son deformaciones del espacio; éste se estira en cierta dirección a la vez que se contrae en la dirección perpendicular para poco tiempo después contraerse en la primera y estirarse en la segunda dirección. Estas oscilaciones entre alargar y acortar se propagan a través del espacio a la velocidad de la luz en una dirección perpendicular a las dos anteriores.

-¿Y cómo las detectó el LIGO?

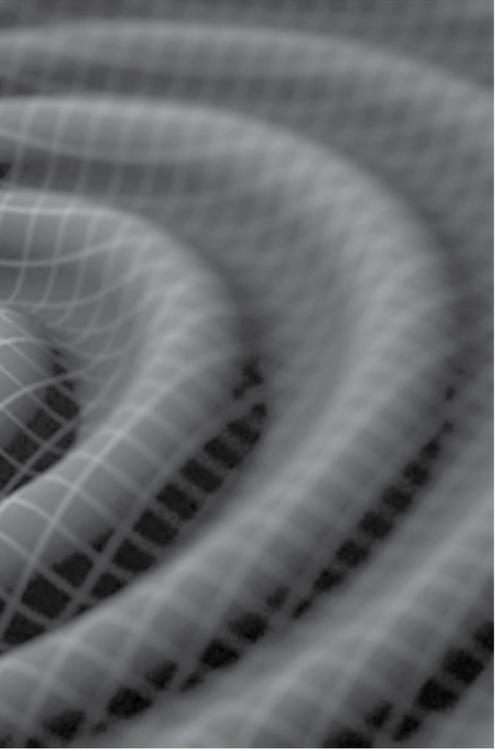
-En esencia, consta de un *interferómetro de Michelson*, como el que demostró a principios del siglo XX que no existe el éter, sólo que mucho más grande y sofisticado.

-¿Un interferómetro de Michelson...?

-Es un instrumento con una fuente de luz láser, un espejo semitransparente que refleja la mitad de la energía luminosa desvián-

## ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.

¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTÁCTANOS: editorial @acmor.org.mx



dola 90 grados de su dirección original y deja pasar la otra mitad (ver fig. 3). Cada uno de estos dos rayos es reflejado mediante uno de dos espejos de regreso hacia el divisor de haz, donde se juntan de nuevo y se dirigen hacia un detector de luz. La luz es una onda formada por un campo electromagnético que oscila apuntando en una dirección y en la opuesta alternadamente. Cuando se juntan dos haces luminosos, se suman sus campos eléctricos. Si al combinarse ambos apuntan en la misma dirección, tenemos *interferencia constructiva* y se produce luz muy intensa; si apuntan en direcciones opuestas tendríamos *interferencia destructiva* y no llegaría luz alguna al detector. La dirección en la que apuntan al juntarse depende del tiempo que tarde cada haz en recorrer la distancia del divisor a los espejos y de regreso, y ésta depende a su vez de la distancia entre los espejos y el divisor. Si un espejo se alejara del divisor, el tiempo de recorrido aumentaría; si se acercara, disminuiría. Midiendo la cantidad de luz que emerge del equipo tenemos una medida de la diferencia entre las longitudes de los dos brazos.

-Bueno. ¿Y qué tanto se nos alejó la luna?

-Unas cuantas décimas de millonésima de millonésima de metro,  $10^{-13}$  m.

-No parece mucho.

-Es como la milésima parte del tamaño de un átomo.

-Si el cambio en la distancia a la luna fue de un milésimo del tamaño de un átomo, ¿qué tan grande puede haber sido el cambio en el tamaño del interferómetro?

-De apenas  $10^{-18}$  m, una milésima parte del tamaño de un núcleo atómico.

-¿Cómo pudieron medir una distancia tan pequeña?

-Tuvieron que recurrir a un enor-

me repertorio de trucos sofisticados. Tuvieron que colgar los espejos de hilos, lo cual les permitía moverse casi libremente en un plano horizontal, o más bien, para que no se movieran en el plano aunque la tierra vibrara. De esa manera, estarían quietos y los cambios en sus distancias se deberían a cambios en la *propiedades métrica* del espacio y no a su movimiento, como los astronautas del ejemplo anterior. Además, se construyeron dos detectores similares en puntos opuestos de los Estados Unidos. Viniendo de tan lejos, las ondas gravitacionales producirían una señal en ambos detectores simultáneamente; señales que no aparecieran en coincidencia deberían desecharse por tener otro origen. Para eliminar las fuentes de ruido y posibles señales espurias tuvieron que colocar los espejos de tal manera que produjeran interferencia destructiva en ausencia de ondas gravitacionales. Sin embargo, la potencia luminosa es proporcional al cuadrado del campo eléctrico, que en el caso de LIGO, sería proporcional a su vez a la pequeñísima amplitud de la onda gravitacional. Como el cuadrado de un número pequeño es mucho más pequeño, recurrieron a un truco para cambiar la señal cuadrática en lineal. Para ello *modularon la fase* de la luz láser, adelantándola y retrasándola decenas de millones de veces por segundo. Esto equivale a añadir a la onda luminosa del láser otras dos ondas; una un poco más roja y la otra un poco más azul. Estas, llamadas *bandas laterales*, no cumplen la condición de interferencia destructiva y se suman a la señal real, de forma que, de acuerdo a la regla del binomio, el cuadrado de su suma  $(s_1 + s_2)^2 = s_1^2 + 2s_1s_2 + s_2^2$ , donde  $s_1$  es la banda lateral y  $s_2$  la pequeñísima señal. El



3. Interferómetro del LIGO. Se muestra el laser, el divisor de haz semirreflejante, las dos parejas de espejos que forman las dos cavidades Fabry-Perot de 4km de longitud en los brazos del interferómetro, el espejo para reciclar la energía que de otro modo regresaría al laser y el detector. No se muestra el modulador de fase. Se indican las potencias en las distintas partes del equipo.

término de enmedio del lado derecho, el doble producto  $2s_1s_2$ , es lineal en  $s$  y por tanto más grande que el término  $s_2^2$  que habrían tenido de no tener bandas laterales. Para que la onda gravitacional produjera el mayor cambio posible en la distancia a los espejos, fue necesario colocar estos lo más lejos posible del divisor de haz; ¡cada brazo del LIGO mide 4km (ver fig. 4)! Para que la señal fuera lo más grande posible, se colocaron espejos adicionales para atrapar a la luz yendo y viniendo cientos de veces en cada brazo, recorriendo entonces una distancia cientos de veces mayor a la nominal. Se emplearon entonces *cavidades Fabry-Perot* en cada brazo. Para evitar el ruido debido a la naturaleza cuántica de la luz se emplearon haces de luz de muy alta intensidad y se recicló la luz que no llegara al detector con una segunda cavidad

Fabry-Perot. Para evitar el ruido debido a las vibraciones térmicas de las moléculas, los espejos se colocaron en los extremos de conductos al alto vacío, a los que se extrajo todo el aire.

-¿Sacaron todo el aire de una tubería de varios kilómetros de longitud?

-Para ello tuvieron que sellar perfectamente todas las uniones. ¡Qué diferencia con las tuberías de agua de nuestra ciudad! La construcción de este equipo costó cientos de millones de dólares, pero su éxito proporciona una nueva herramienta para estudiar el cosmos y vuelve observables fenómenos como la colisión entre agujeros negros que no habían podido ser vistos antes. Además, confirmó una de las predicciones más importantes de la teoría de la relatividad general. Curiosamente, hasta el mismo Einstein llegó a dudar de la posibilidad de la existencia, ahora

confirmada, de ondas gravitacionales [ref. 3] Quizás éste sea el descubrimiento más importante del siglo [para más información, navegue por la página, ref. 4, o busque LIGO].

## Referencias

B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, *Physical Review Letters* **116**, 061102 (2016). <http://bit.ly/213sS9d>  
V. Connaughton et al., *Fermi GBM Observations of LIGO Gravitational Wave event GW150914*, preprint, <http://go.nasa.gov/1U27ZsV>  
Daniel Kennefick, *Einstein versus the Physical Review*, *Physics Today* **58**, 43 (2005). <http://bit.ly/1U2b5NN>  
*LIGO Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, <https://www.ligo.caltech.edu/>



4. Foto del detector LIGO de Livingston. Note la longitud de los tubos evacuados en que viaja la luz laser.