

Los agujeros negros y las ondas del Doctor Einstein

Mario Alberto Rodríguez-Meza*

Recepción: 2 de mayo de 2016

Aceptación: 24 de junio de 2016

*Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México.

Correo electrónico: marioalberto.rodriguez@inin.gob.mx

Se agradecen los comentarios de los árbitros de la revista.



Resumen. Se describen los principales desarrollos científicos que llevaron a la detección de las ondas gravitacionales por el proyecto LIGO: la relatividad general, sus predicciones de agujeros negros y ondas gravitacionales, la relatividad numérica y las simulaciones de la colisión y coalescencia de dos agujeros negros y los desarrollos de diversos detectores de ondas gravitacionales. Finalmente la detección de las ondas gravitacionales confirma la existencia de los enigmáticos agujeros negros.

Palabras clave: relatividad general, ondas gravitacionales, agujeros negros, relatividad numérica, interferómetro.

Doctor Einstein's Black Holes and Waves

Abstract. We describe the main scientific developments that lead LIGO project to the detection of the gravitational waves: general relativity, black holes and gravitational waves predictions; numerical relativity and the collision and coalescence simulations of binary black holes and the development of different kind of gravitational wave detectors. Most important, this detection is confirming the existence of the enigmatic black holes.

Key words: general relativity, gravitational waves, black holes, numerical relativity, interferometer.

Introducción

Podríamos comenzar este relato contando lo común y corriente cuando se habla de la relatividad general, o que Albert Einstein presentó su versión hace poco más de cien años (25 de noviembre de 1915) ante la Academia Prusiana de Ciencias en Berlín. Sin embargo, lo que ya no es muy conocido es que cinco días antes de que Einstein presentara su “versión”, el matemático David Hilbert le había ganado en presentar otra versión, en Göttingen, la cual dedujo a partir de un principio variacional (Rodríguez-Meza, 2015).

Meses después de estos dos reportes, en 1916, el astrónomo alemán Karl Schwarzschild publica la primera solución a las ecuaciones, bastante complicadas, de la relatividad general. La

solución que encontró Schwarzschild es la precursora de los enigmáticos agujeros negros, esos objetos que atrapan todo lo que está a su alcance, incluso la luz, de ahí su nombre. Y también en 1916 Einstein encontró soluciones tipo ondulatorio a su ecuaciones linealizadas, es decir, en el régimen de campo débil donde se podrían encontrar algunos resultados (Einstein, 1916). Descubrió que el espacio y el tiempo pueden oscilar propagando ondas gravitacionales que se mueven a la velocidad de la luz. Estas ondas son perturbaciones pequeñísimas sobre las que hubo poca atención hasta el debate en 1957, en Chapel Hill, North Carolina, en el que se puso sobre la mesa la pregunta sobre su existencia y posibilidad de ser medidas. Es justo la perturbación gravitacional ondulatoria producida por la colisión dramática de dos agujeros negros

masivos lo que las antenas gemelas de LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) detectaron el 14 de septiembre de 2015 (Abbott *et al.*, 2016). LIGO no estaba oficialmente en funciones, puesto que había sido apagado en 2010. Después, cuando los interferómetros habían sido mejorados en cuanto a la sensibilidad de los detectores, aumentando la potencia de los láseres y mejorando el aislamiento sísmico de los espejos, los técnicos hicieron pruebas y arrancarían en unos días más; no obstante, de pronto apareció la señal y *escucharon el gorjeo*. El anuncio de este hallazgo espectacular se acordó que se haría para el mismo día en que la revista *Physical Review Letter* publicara el artículo con los resultados, lo cual sucedió el 11 de febrero de 2016 (Abbott *et al.*, 2016). Bien, comencemos.

1. Relatividad general

¿Qué es la relatividad general? Esta teoría nos dice que la gravedad ya no es más una fuerza como Newton lo pensaba, ahora es una deformación del espacio y el tiempo (que fueron unificados por el matemático Hermann Minkowski en una sola entidad, el espacio-tiempo) producida por los cuerpos. Por ejemplo, el Sol deforma el espacio-tiempo en su vecindad y los planetas se mueven siguiendo las geodésicas de este espacio-tiempo curvado, trayectorias con la longitud mínima de entre las posibles que unen dos puntos en este espacio-tiempo. La idea de Einstein fue darse cuenta –al igual que en la relatividad especial que había formulado en 1905– que con sólo dos postulados podría desarrollar la teoría: *a)* las leyes son las mismas sin importar el observador (esté en movimiento uniforme o en movimiento acelerado) y *b)* la gravedad y la aceleración son equivalentes. El primero es el principio de relatividad del movimiento no sólo aplicable a observadores inerciales sino también a los acelerados, también conocido como principio de covariancia general, mientras que el segundo postulado es el principio de equivalencia y Einstein llegó a él usando sus famosos experimentos pensados. Julio Verne en su novela *Alrededor de la Luna*, publicada en 1869 –100 años antes del alunizaje del Apolo 11–, ya había anticipado esta idea de equivalencia en la escena de *Satélite*, el perrito muerto. Julio Verne muere en 1905, el *annus mirabilis* de Einstein. Desarrollando más las ideas, Einstein concluyó entonces que la gravedad es el resultado de que el espacio-tiempo se deforma curvándose en presencia de los cuerpos. Entre más masivo sea un objeto mayor es la deformación del espacio-tiempo en la vecindad de él. Además, estableció que la dinámica de los cuerpos es tal que siguen trayectorias geodésicas de este espacio-tiempo curvo, lo que nos

lleva al problema de calcular distancias en espacios curvos generales. En un espacio plano como aquel al que estamos acostumbrados, este cálculo se hace empleando el teorema de Pitágoras, que para dos puntos muy cercanos (infinitesimalmente cercanos, dirían los matemáticos) la distancia se escribe en coordenadas cartesianas como: $ds^2 = dx^2 + dy^2$. Esta pequeña distancia, ds , se llama *elemento de línea*. En un sistema de coordenadas polares cambia a: $ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2$, el elemento de línea depende de la posición en este caso. Si hubiera tan sólo un sistema de coordenadas en el cual los términos cuadráticos diferenciales llevaran todos coeficientes constantes, entonces el espacio será plano, sin curvatura, que es este caso. En general, el cálculo de una longitud en una superficie curva arbitraria se hace usando: $ds^2 = g_{xx} dx^2 + g_{xy} dx dy + g_{yy} dy^2$. A los coeficientes g_{xx} , g_{xy} , y g_{yy} se les conoce como *coeficientes métricos* y la relatividad general nos dice cómo obtenerlos para el espacio-tiempo en presencia de cuerpos masivos. En particular, en la relatividad especial, Minkowski escribió el elemento de línea como: $ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$. Para la luz, $ds = 0$, que es consistente con que la velocidad de la luz es una constante e igual a c .

Con esta metodología que desarrollaron Einstein (y Hilbert) se pueden calcular las órbitas de los planetas alrededor del Sol. Estas órbitas son prácticamente iguales a las newtonianas en todos los casos, excepto para Mercurio, en cuyo caso por su cercanía al Sol se manifiestan claramente los efectos relativistas, fenómeno conocido como la *precesión del perihelio de Mercurio*. Las predicciones de la relatividad general fueron *a)* corrimiento al rojo de la frecuencia de una onda luminosa en presencia de un campo gravitatorio intenso, *b)* deflexión de la luz al pasar por la vecindad de un campo gravitacional intenso como el del Sol y *c)* las ondas gravitacionales que son pequeñas fluctuaciones del espacio-tiempo. Confirmadas todas, excepto las ondas gravitacionales, aunque se podría decir que ya fueron detectadas indirectamente con el estudio observacional del pulsar binario PSR 1913 + 16, cuyo periodo va disminuyendo al emitir ondas gravitacionales (Hulse y Taylor Jr., 1975). Los datos de la evolución temporal del periodo se ajustan casi de manera perfecta con lo que predice la relatividad general. Estas pruebas a la relatividad general son en el límite de campo débil. No hay pruebas en el límite de campo fuerte, hasta ahora.

2. Agujeros negros

La solución encontrada por Schwarzschild fue otra de las predicciones. Presentaba una singularidad, un defecto

que no era muy agradable, para la región interna limitada por un radio, llamado de Schwarzschild. No obstante, no se le prestó mucha atención, ya que lo que importaba era la solución más allá del este radio donde no había problemas. Pero se comenzó a entender mejor la evolución y muerte de las estrellas. Una estrella al hacerse vieja se va contrayendo y bajo ciertas circunstancias podría colapsarse convirtiéndose en un objeto muy pequeño y denso. Entonces, se pensó que este asunto molesto del radio de Schwarzschild debía estudiarse en detalle y Einstein *le metió el diente* y trató de probar que una estrella no podría colapsarse y alcanzar un radio menor al de Schwarzschild. El modelo que construyó era muy simple, muy a su estilo como su modelo de un sólido, todos los átomos vibrando con la misma frecuencia y por lo simple no logró explicar la capacidad calorífica de los sólidos a bajas temperaturas (Cheng, 2013). En este caso, Einstein consideró que todas las partículas seguían órbitas circulares en planos diferentes pero todos con un centro común, el centro de masa del sistema. La conclusión que obtuvo fue que las órbitas no podrían ser menores que 1.5 veces el radio de Schwarzschild y anunció que la singularidad de Schwarzschild no tenía realidad física. Entonces, Oppenheimer y su estudiante Hartland Snyder revisaron el problema y en vez de las órbitas circulares de Einstein consideraron un sistema más realista: un aglomerado esférico de neutrones a cuyo colapso se le opone la fuerza nuclear repulsiva entre ellos. Encontraron que si la masa de la configuración es mayor que tres cuartos la masa del Sol, la fuerza nuclear no le gana a la fuerza gravitacional atractiva y el sistema se colapsa y además no se detiene en el radio de Schwarzschild sino que se hunde por siempre. Este extraño comportamiento sólo se logró entender hasta 1960 cuando los físicos se dieron cuenta que la singularidad de Schwarzschild era un *artifact* matemático que resultaba de la mala elección del sistema de coordenadas. La masa colapsada en realidad formaba una región muy curvada del espacio-tiempo rodeada por una superficie al radio de Schwarzschild dentro de la cual nada escapa. John Wheeler, en 1967, le dio el nombre de *agujero negro* a estos extraños objetos. El nombre era trivial, pero resultó todo un acierto “comercial”. Es un objeto masivo colapsado, como una estrella que bajo ciertas condiciones se colapsa, sin dejar rastro ni de su materia, ni de sus manchas y prominencias, ha desaparecido como el gato Cheshire en *Alicia en el país de las maravillas* dejando tan sólo la sonrisa, la atracción gravitacional. Cualquier cuerpo que cruce una superficie con un radio particular dado por la masa del agujero negro, radio de Schwarzschild, desaparece para no salir nunca

jamás. Ni la luz, habiendo cruzado esta frontera, escapa. El único rastro que deja un cuerpo material o la luz es que el agujero negro engorda aumentando su superficie de no regreso, llamada *horizonte*. Estos hipotéticos cuerpos ya habían sido predichos hace siglos, por el reverendo John Michell en 1783, un astrónomo amateur británico, y en 1795 por Pierre-Simon Laplace, matemático francés.

Actualmente, ya con la astronomía de rayos X desarrollada, se tienen fuertes evidencias observacionales de estos objetos. El típico es el Cygnus X-1, detectado por el observatorio Uhuru, que midió pulsos de rayos-X provenientes de la región Cygnus. Estudiando el movimiento de su estrella compañera se pudo calcular que la masa del agujero negro es de 9.5 masas solares. Los rayos-X surgen por el gas de su compañera que el agujero negro comprime al ir comiéndoselo, por lo que aumenta su temperatura. La temperatura crece a tal grado que se emiten rayos X. El agujero negro con la mayor masa jamás encontrado es de unas 10^9 a 10^{11} masas solares y fue encontrado en 2014 por el astrónomo del INAOE (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica) Omar López-Cruz y sus colegas (López-Cruz *et al.*, 2014).

Resolver las ecuaciones de la relatividad general para obtener los coeficientes métricos no es fácil, incluso en muchos de los casos con alta simetría. Es un aparato matemático que consiste de diez ecuaciones diferenciales parciales no-lineales fuertemente acopladas, especiales. Especiales porque gobiernan el espacio-tiempo mismo, a diferencia de las ecuaciones de Maxwell, por ejemplo, que gobiernan a los campos eléctricos y magnéticos en su evolución en un espacio-tiempo fijo, inmutable. Una posibilidad para resolver las ecuaciones de la relatividad general es considerar el efecto gravitacional de un cuerpo como el Sol, en donde se puede considerar que hay simetría esférica, es decir, la geometría es tal que las soluciones sólo dependen de la distancia al centro del objeto. Este fue el camino que siguió Schwarzschild. Este caso es el de campo fuerte si estamos cerca del objeto o si su masa es varias veces la masa del Sol. La otra posibilidad es considerar que el espacio-tiempo de Minkowski es débilmente perturbado por lo que rápido se llega a una ecuación de onda, muy similar a la ecuación que gobierna la propagación de una onda de sonido. Por eso, Einstein pudo predecir en este límite la existencia de las ondas gravitacionales. Este caso es de campo débil (Cheng, 2013; Einstein, 1916).

Los agujeros negros teóricamente existen de varios tipos (Cheng, 2013). El clásico es el de Schwarzschild, cuya métrica está dada por el elemento de línea: $ds^2 = S(r) c^2 dt^2 - dr^2 / S(r) - r^2 d\theta^2$, donde $S(r) = 1 - 2GM/c^2r$. Cuando

$r = 2 GM/c^2$, $S(r)$ se hace cero y aparece una singularidad. A este valor de r se le conoce como el radio de Schwarzschild y define un volumen del cual ni la luz puede salir. Si M fuese la masa del Sol, el radio de Schwarzschild valdría 3 km. Si además el agujero negro está cargado ahora, no nada más hay un radio, sino dos. Esta clase de agujeros negros fueron estudiados por Reissner y Gunnar Nordström poco después de que Schwarzschild encontrara su solución. Como casi todos los objetos en el cielo rotan, otro tipo de agujeros negros que debemos considerar son los que tienen momento angular. Roy Kerr, campeón neozelandés de *bridge*, reportó en su tesis doctoral la solución a las ecuaciones de Einstein para este caso. Como en el caso de un agujero negro cargado, también el agujero de Kerr tiene dos radios característicos.

Ahora, un caso de mucho interés astrofísico es el problema de dos cuerpos, como el sistema combinado Sol-Tierra, Tierra-Luna, estrellas binarias, por ejemplo. En la física de Newton este problema es fácil de atacar, pero no así en la relatividad general. Una vez que se logró entender más la física de un sólo agujero negro, el paso natural era considerar un sistema de dos agujeros negros orbitando uno alrededor del otro. No hay solución analítica para un sistema binario en relatividad general. Tiene además la complicación adicional de que hay emisión de ondas gravitacionales haciendo que el sistema pierda energía y momento angular, como es el caso del pulsar binario PSR 1513-16 descubierto en 1974 por Russell Hulse y Joseph Taylor Jr., con el radiotelescopio de 300 m de Arecibo, Puerto Rico (Hulse y Taylor Jr., 1975). Y lo que es peor no hay un problema de “dos-cuerpos”, es más bien el cálculo de un espacio-tiempo, el asociado a los dos. El horizonte de eventos individual (o las fronteras de cada objeto) se revelará hasta que se conozca el espacio-tiempo combinado. Entonces, debemos buscar soluciones numéricas de las ecuaciones de campo. Toda una área de investigación muy activa llamada *relatividad numérica* (Alcubierre, 2008; Sperhake 2015). Así pues, en esencia la diferencia entre el problema de dos agujeros negros orbitando uno en torno al otro y el correspondiente problema de dos cuerpos en la física de Newton es que en Newton las partículas son puntuales, en relatividad general los agujeros negros son regiones extendidas de gran curvatura, y además en el caso de dos agujeros negros orbitando entre sí hay disipación de energía que producen ondas gravitacionales, que no es el caso en el problema de dos cuerpos newtonianos.

La relatividad numérica significa la integración directa de las ecuaciones de Einstein para obtener los coeficientes métricos del espacio-tiempo en presencia de materia, en

general. Un caso particular es considerar el caso sin materia (espacio-tiempo vacío), por ejemplo, dos agujeros negros orbitando uno alrededor del otro. Incluso en este caso, aparentemente simple, las ecuaciones son muy difíciles de resolver y este gran reto ha sido llamado *El Santo Grial* de la relatividad numérica. La solución numérica de este gran reto considera tres etapas o fases típicas: *a)* fase 1 que comienza con los dos agujeros negros separados formando un estado ligado; es una fase regular en la cual los dos agujeros rotan uno alrededor del otro en órbitas normalmente circulares y la señal de la onda gravitacional es casi senoidal. *b)* Fase 2 es la etapa de coalescencia, muy irregular, en la cual los dos agujeros negros se aproximan mucho aumentando su velocidad; la señal aumenta bastante en amplitud y frecuencia. *c)* Fase 3 es la etapa final de oscilaciones amortiguadas en la que el remanente, un agujero negro combinado, pierde toda su estructura. Pierde, además de lo anterior, momento angular y energía. Termina siendo un agujero negro rotando (de Kerr) con una masa, la cual es la suma de las dos masas de los agujeros negros menos la masa que traducida a energía se llevó la onda gravitacional emitida que se propaga a la velocidad de la luz y su amplitud decae como el inverso de la distancia. Esta última fase también es conocida en inglés como *ring down* en analogía de cómo el sonido de una campana se apaga, desaparece.

En pocas palabras sería que el espacio-tiempo comienza desde un estado inicial y es evolucionado hasta un estado final. El primer intento serio para resolver numéricamente las ecuaciones de campo lo dieron en 1964, Susan Hahn y Richard Lindquist, pero hasta la década de los setentas se reportaron las primeras simulaciones exitosas cuando Larry Smarr y Kenneth Eppley lograron colisionar de frente dos agujeros negros. Eran tiempos con poco poder de cómputo y las simulaciones eran modestas, de baja resolución y en condiciones de simetría esférica o axial. Con el advenimiento de las súper computadoras y el desarrollo de nuevas técnicas numéricas robustas, las cosas cambiaron dramáticamente (Sperhake, 2015). Y es que los relativistas numéricos tardaron años en tener un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales sujetas a condiciones iniciales y de frontera, bien planteado, que si no se tiene, significa que un pequeño error numérico (un error de redondeo, por ejemplo) que se cometa al construir la condición inicial del espacio-tiempo crece exponencialmente destruyendo la solución.

El *breakthrough* de Frans Pretorius (Pretorius, 2005), el problema de la colisión de dos agujeros negros era todo un reto hasta 2005. Se podía seguir la evolución por muy poco tiempo, ni una órbita se lograba, cuando ya el ruido

numérico invadía la solución y destruía la simulación. Entonces, apareció el consentido de Matthew Choptuik, el joven Pretorius, quien causó una gran conmoción en el mundo de los relativistas numéricos. Se quedaron pasmados sin saber que hacer: ¿ahora qué hacemos?, ¿qué sigue? Se preguntaban. La idea de Pretorius fue hacer las cosas desde cero y encontrar un tratamiento numérico estable de las singularidades del espacio-tiempo combinado de los dos agujeros negros que evitara la aparición en la computadora de los problemáticos *números no asignados* (que en la jerga computacional se llaman NAN, por sus siglas en inglés). En 2006 Manuela Campanelli y su grupo volvieron a revisar sus códigos numéricos que fallaban y con *comentar* una línea lograron reproducir la simulación de Pretorius (Alcubierre, 2016). A la computadora no le gustan los infinitos. De este modo, cuando en la simulación un infinito está cerca del horizonte del agujero negro comienza a actuar la singularidad. Entonces, uno evitaba esa zona poniendo una condición a mano para no entrar ahí, ya que el error crecía, pero como ya estás en el agujero negro, lo que ahí ocurra ya no importa y esos errores además no se propagan hacia fuera. Esa fue la línea que se comentó. La simulación más precisa hasta la fecha es la lograda por Scheel *et al.* (2009) que logró hacer 16 órbitas en la primera fase.

3. Ondas gravitacionales

Una vez resuelta la colisión de dos agujeros negros, ¿qué sigue? Simple, hacer todas las simulaciones posibles variando los parámetros geométricos y físicos de la colisión. Con esto se logró tener un buen catálogo de escenarios posibles de la colisión de dos agujeros negros: varios casos de parámetros de impacto, diferentes masas, diferentes valores de espín, diferentes distancias de observación, etcétera, por lo que se logró conocer con mucho detalle las señales que llegarían a la Tierra para cada uno de los casos catalogados. Eran señales muy débiles, pero sabiendo qué buscar da como resultado que sea mucho más fácil de encontrar entre el ruido de fondo de los aparatos de medición. Es como tratar de localizar a un amigo en un estadio de fútbol repleto de aficionados, todos gritando, incluso el amigo. Difícil, ¿verdad? Pero si sabemos más o menos en qué zona buscar, y dado que conocemos el timbre de su voz, podremos ir discerniendo poco a poco mientras el amigo no deje de gritar.

Eran señales muy débiles, hemos dicho, pero que, en el caso de la colisión de agujeros negros de decenas de masas solares, son eventos en el régimen de campo fuerte que perturban intensamente el espacio-tiempo en su vecindad. Sin saber qué buscar resultaba difícil la búsqueda; sin

embargo, Abbott y compañía ya habían desarrollado varios machotes (*templates*) con posibles escenarios de colisión de aproximadamente una décima de segundo de duración que insertaban entre la señal filtrada que registraban. Fue entonces que se detonó la alarma y Marco Drago, en Hannover, Alemania, recibió un correo electrónico automático con las ligas a dos gráficas de señales ondulatorias registradas por las antenas gemelas. Él estaba entrenado para reconocer si eran señales de eventos asociados a ondas gravitacionales y qué las provocaban. ¡Sí, un evento había sido detectado! Tuvieron tal suerte que lo vieron durante las pruebas de arranque de las antenas gemelas.

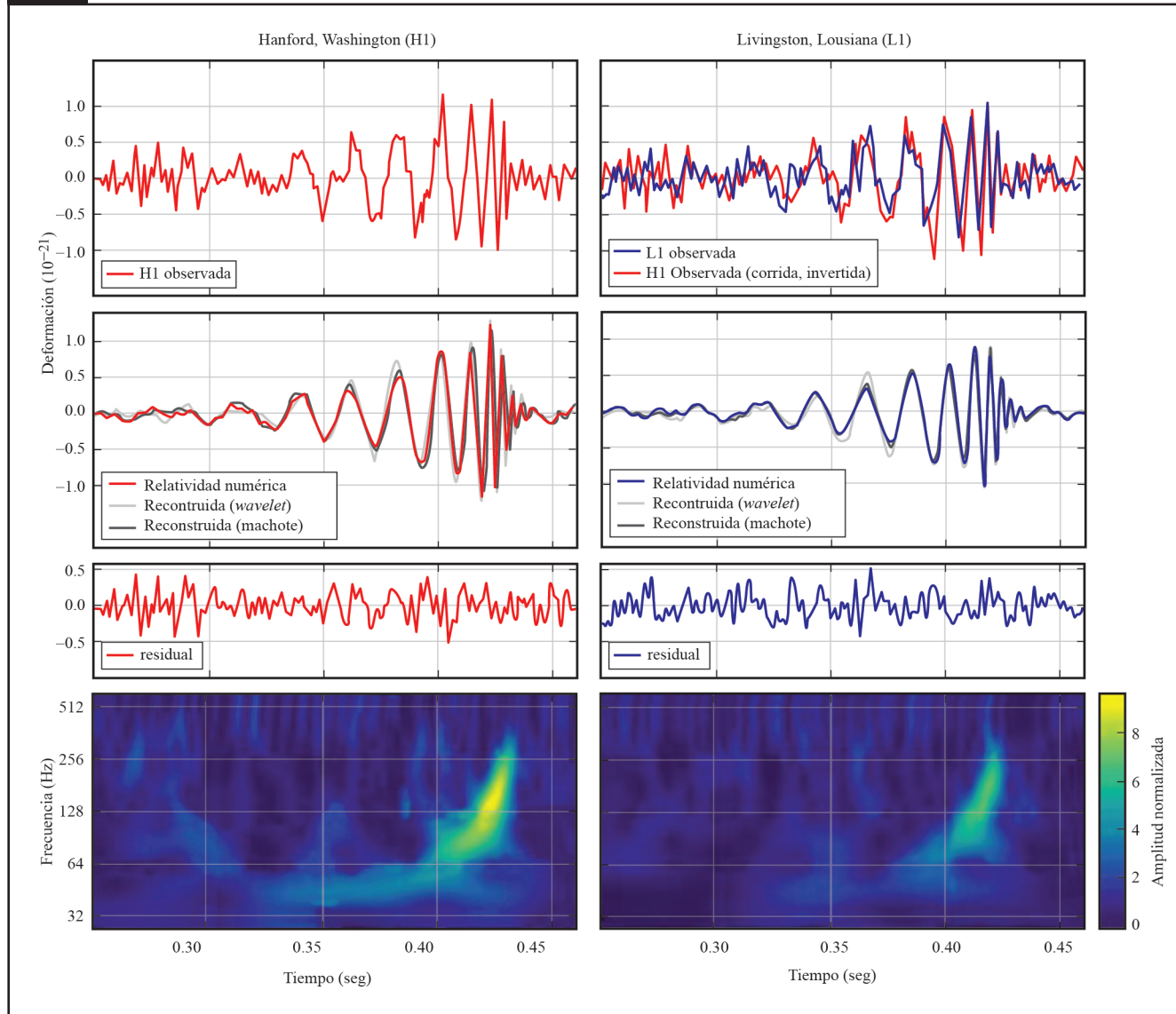
En la década de 1960 Joseph Weber llevó a cabo el primer intento serio para observar las ondas gravitacionales. Colocó dos cilindros de aluminio, de 1.5 m de largo y 60 cm de diámetro, de casi una tonelada y media de peso, separados a una distancia de mil kilómetros, uno en Maryland y otro en el Laboratorio Nacional de Argonne, cerca de Chicago, todo en Estados Unidos. Cada cilindro tenía en su superficie cristales semiconductores piezoeléctricos capaces de emitir una corriente eléctrica al ser deformados que colgaban de filtros acústicos y estaban en una cámara al vacío. Esperaba que los cilindros fueran capaces de detectar pequeñas vibraciones, desplazamientos del orden de 10^{-16} cm. Esperó pacientemente durante muchos meses y el 30 de diciembre de 1968 los dos detectores respondieron al registrarse señales simultáneamente. La enorme separación entre los cilindros indicaba que no podría ser un accidente, por lo que en 1969 reportó en *Physical Review Letters* que las dos antenas habían detectado señales del paso de una onda gravitacional (Weber, 1969). Los pulsos indicaban que la perturbación gravitacional parecía venir del centro de la Vía Láctea. Nunca se pudo corroborar su hallazgo.

A pesar de eso, la búsqueda de las ondas gravitacionales continuó y varios equipos en el mundo construyeron antenas similares, con algunas mejoras, a la diseñada por Weber. Después se construyeron otras, pero ahora diseñadas para operar a bajas temperaturas, a la temperatura de helio líquido, con el fin de reducir el ruido térmico. Había cilindros de aluminio, de zafiro, niobio (que puede estar flotando por medio de la superconductividad). En 1982 Brown y sus colegas elaboraron en los Laboratorios Bell un reporte donde mostraban los resultados de 440 días de observación con un detector de aluminio de unas cuatro toneladas de peso que mejoró la señal a ruido y el aislamiento. Sólo midieron un gran evento que ninguna de las otras antenas dio cuenta. Un gran evento en catorce meses estaría de acuerdo con el ritmo de apariciones de supernovas en nuestra galaxia.

La alternativa a las antenas tipo Weber fueron los interferómetros que Albert Abraham Michelson había inventado en 1880. Nacen así varios proyectos basados en interferómetros terrestres: LIGO, VIRGO (es el interferómetro detector de ondas gravitacionales del European Gravitational Observatory, EGO, instalado cerca de Pisa, Italia), GEO600 (interferómetro de 600 m instalado en Hannover, Alemania), KAGRA (Kamioka Gravitational Wave Detector, en Kamioka-cho, Japón) y uno para ser enviado al espacio: LISA (Laser Interferometer Space Antenna). GEO600 sirve como el laboratorio de pruebas de los dispositivos de detección que después pasan a LIGO.

Finalmente, el 14 de septiembre de 2015 los interferómetros gemelos del proyecto LIGO respondieron a la misma perturbación. Una perturbación del espacio en una razón de 1 a 10^{21} . Tamaños miles de veces más pequeños que las dimensiones de un protón. La señal que registró la antena en Hanford, en Washington en la costa oeste norte de Estados Unidos, casi se empalma en magnitud y forma de las oscilaciones con la detectada por la antena en Livingston, Louisiana, que la registró 7 ms antes (gráfica 1), una perturbación del espacio-tiempo que pareció provenir del hemisferio sur celeste. Es el resultado de la colisión y

Gráfica 1. Señales detectadas en Hanford, Washington (panel izquierdo) y en Livingston, Louisiana (panel derecho) por los interferómetro gemelos del experimento LIGO.



Nota: en el renglón superior de los dos paneles se muestran las señales detectadas y en el derecho se muestran además cómo se empalman las dos señales. En el renglón de en medio se muestra lo que dan las simulaciones que mejor concuerdan con las observaciones y que nos estarían diciendo a qué distancia ocurrió la colisión y qué masas tenían los agujeros negros que participaron en ella. El siguiente renglón, más abajo, nos da el error residual. Y hasta abajo se tiene cómo cambió la frecuencia de la señal. Comenzó muy regular con una frecuencia de unos 35 ciclos por segundo (Hz), correspondiendo a 15 órbitas completas de los agujeros negros, y en 0.2 segundos rápidamente creció hasta 250 Hz, después se hizo caótica y desapareció. Los agujeros negros se aproximaron a una velocidad relativa de poco más de 30% de la velocidad de la luz y aumentó hasta ser casi 60% (versión en español del original de Abbott *et al.*, 2016).

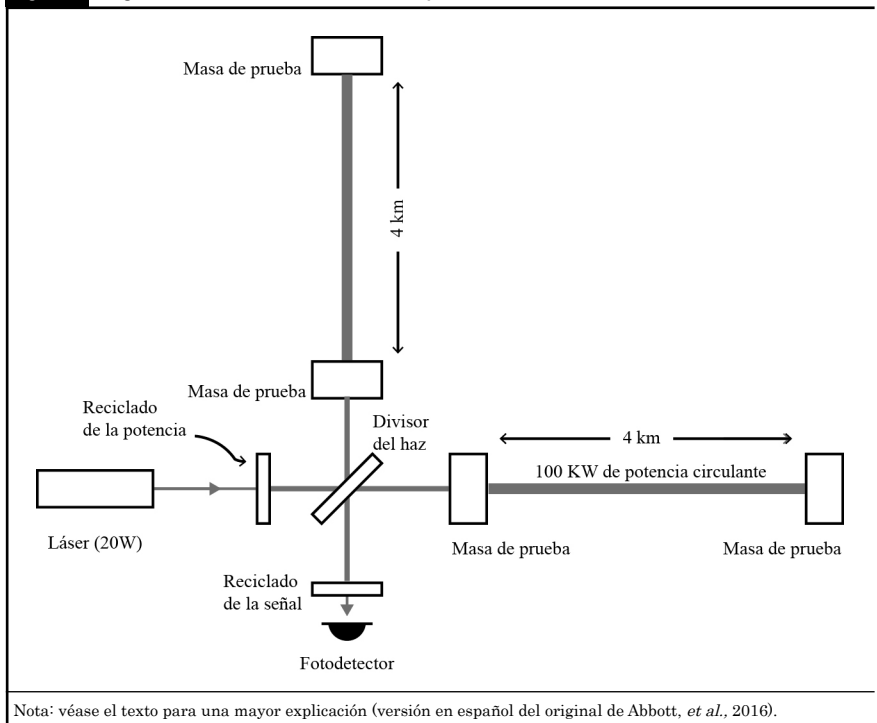
coalescencia de dos agujeros negros, uno con una masa de 29 veces la del Sol y el otro con una de 36 veces. Ocurrió hace 1 300 millones de años –la vida en la Tierra comenzaba apenas– y casi tres veces la masa del Sol fue transformada en una onda gravitacional en una fracción de segundo. El evento, al que se le llamó GW150914 (no se quebraron la cabeza para nombrarlo) duró 20 microsegundos. El pico de la potencia emitida fue cincuenta veces la de todo el Universo visible. Sería interesante imaginar cómo miraríamos al Universo si las ondas gravitacionales se pudieran ver, como vemos la luz. Otro detalle fue que al observar la señal, los expertos de la colaboración LIGO no tuvieron dudas, era la colisión de dos agujeros negros muy masivos. Una vez extraída del ruido de fondo la señal tenía sus tres fases muy claras. Lo curioso es que si la señal se pasa tal cual a un aparato de sonido *podemos escuchar el gorjeo* de la perturbación. Es como estar escuchando en tiempo real al espacio-tiempo.

El proyecto LIGO, concebido en 1970 pero inaugurado en 1999 gracias a los esfuerzos de Rainer Weiss, Kip Thorne y Ronald Drever, se basa en la observación de las ondas gravitacionales. Usa dos interferómetros gemelos separados 3 000 km, lo que permite determinar la dirección de llegada de la señal y además de que no es causada por un fenómeno local. Cada uno con la forma de la letra L, con brazos de 4 km de largo con tubos al vacío por los cuales atraviesa un rayo láser y que actúan como si fueran una antena detectora de las deformaciones del espacio-tiempo (figura 1). Al comenzar su camino, el rayo láser se divide en dos y cada parte hace su viaje de ida y vuelta a lo largo de su tubo. Después de ir y venir varias veces los rayos se unen de nuevo produciendo el patrón de interferencia que podría provenir de cambios pequeñísimos en las distancias relativas entre los espejos reflectores (las masas de prueba en la figura 1) y que están en los brazos de la L, estirándolos y contrayéndolos alternadamente el paso de la onda. Los espejos reflectores –que no son más que los “observadores” de la relatividad general– son muy pesados y están suspendidos para evitar al máximo las vibraciones externas (a pesar de esto la caída de las Torres Gemelas fue detectada por ellos)

(Alcubierre, 2016). De hecho, es muy parecido al interferómetro que Michelson inventó para detectar el viento del éter, experimento fallido que dio origen a la relatividad especial, pues Einstein tomó este resultado negativo y lo hizo una de las dos hipótesis de la relatividad especial. Los brazos de LIGO son unas 360 veces más largos que el que fue usado por Michelson y Morley, sus brazos eran de 11 m de largo: entre más largo el interferómetro es más sensible. Su objetivo es lograr cambios en la longitud de los brazos 10 000 veces más pequeños que el tamaño del protón. No obstante, 4 km podría no ser suficiente. Así que el interferómetro fue modificado para incluir cavidades Fabry Perot, que es realmente el tubo completo de 4 km, pero que tiene espejos adicionales alineados con una alta precisión de tal manera que hacen que el haz del láser vaya y venga 280 veces antes de combinarse para dar el patrón de interferencia. Lo anterior significa que en realidad se ha aumentado la longitud de la trayectoria que sigue la luz del láser a: ¡1 120 km! Con esto, LIGO es capaz de detectar cambios en los brazos miles de veces más pequeños que el tamaño de un protón.

Esta medición traería como consecuencias dos cosas: a) la observación de la colisión de dos agujeros negros, predicha ya, pero nunca observada y b) la detección por primera vez de una onda gravitacional. Otra consecuencia colateral es que abriría paso a una nueva astronomía, la astronomía de las ondas gravitacionales. Las perturbaciones

Figura 1. Diagrama del interferómetro usado en el experimento LIGO.



gravitacionales cruzan el espacio impunemente. Por ejemplo, al explotar una supernova veríamos la explosión de su núcleo directamente. Lo que actualmente observamos es la onda expansiva deducida de su curva de luminosidad. Como podemos escuchar el espacio-tiempo, estos eventos de colisión de objetos masivos como estrellas de neutrones o agujeros negros o las propias explosiones de supernovas nos darían no una candela estándar sino una sirena estándar y con ella se podría estimar con mucha precisión el parámetro que nos dice con qué velocidad se alejan las galaxias distantes, llamado de Hubble. Por todas estas razones seguramente habrá un premio Nobel de Física. Ya veremos quienes de los individuos resultan agraciados.

Para que no deje de sorprendernos el travieso Einstein, en este punto del relato cabe muy bien hacer una pausa y mencionar una más de sus contribuciones. El láser se basa en la *emisión estimulada*, el cual es un concepto introducido por Einstein en 1916 (Cheng, 2013). La idea de que los átomos tiene a los electrones ocupando niveles discretos de energía la había introducido ya Bohr. Entonces, Einstein estudió el problema de un gas de átomos interactuando con radiación electromagnética y consideró el caso más simple: un átomo con dos niveles solamente y lanzó la hipótesis de que las transiciones entre estados estaban dadas por las probabilidades de que ocurrieran las transiciones haciendo pasar a un electrón del estado menos energético al más energético y viceversa. Un electrón podía ser excitado al nivel superior con una probabilidad dependiente de la densidad de radiación presente y podía regresar al estado inferior con una probabilidad dada exclusivamente por las propiedades intrínsecas de los átomos. Entonces encontró que para obtener la fórmula de Planck para la densidad de radiación debería haber un término de emisión adicional que llamó *emisión estimulada* y que la emisión fuera tal que se emitiera radiación monocromática. La probabilidad de esta emisión debía depender de la densidad de radiación presente, por eso el adjetivo *estimulada*. Esta hipótesis logró dos cosas: *a)* estableció un puente entre la radiación de cuerpo negro y la teoría de Bohr y *b)* sentó la base teórica de lo que décadas más tarde originó el máser y el láser. Sí, el láser, el elemento básico en el moderno interferómetro de Michelson. Sin él sería difícil concebir otra manera de medir las ondas gravitacionales.

4. Los errores de Einstein

Einstein escribió como 180 artículos de investigación. Algo que muy pocos saben es que unos 40 de ellos están llenos

de errores. El típico ejemplo es la primer prueba de que $E = mc^2$ estuvo incompleta (Ohanian, 2008). Por muchos años se estuvo peleando al tratar de probarla, pero nunca lo logró. A pesar de los errores que Einstein cometió, las conclusiones de muchos de sus artículos son correctas y muchas de las predicciones que se desprenden de ellos han sido confirmadas. Es más, les han dado premios Nobel a varios científicos, entre ellos a Jean Perrin por sus trabajos experimentales sobre el movimiento Browniano, a Charles Townes, Nicolay Basov y Aleksandr Prokhorov por la invención del máser y el laser, a Russell Hulse y Joseph Taylor Jr. por su descubrimiento de un nuevo tipo de pulsares y a Eric Cornell, Wolfgang Ketterle y Carl Wieman por la obtención del condensado de Bose-Einstein en gases diluidos.

Einstein se ofendía muy a menudo cuando alguien criticaba su trabajo. En 1936, él y Nathan Rosen –joven colega de Einstein en el Instituto de Estudios Avanzados en Princeton– enviaron un manuscrito a *Physical Review*, la misma que, el 21 de enero de 2016, recibió el manuscrito y presentó los resultados de LIGO que anunciaban el descubrimiento de las ondas gravitacionales. El título del manuscrito que Einstein y Rosen enviaron era *Do gravitational waves exist?* (¿Existen las ondas gravitacionales?). John Tate, el editor, sospechó y decidió enviarlo a un árbitro, ahora se sabe que fue Howard Percy Robertson (Kennefick, 2005). En este manuscrito Einstein y Rosen trataron de resolver las ecuaciones completas de la relatividad general sin hacer ninguna aproximación, como lo había hecho Einstein meses después de ese histórico noviembre de 1915 cuando predijo las ondas gravitacionales, que en ese entonces consideró pequeñas fluctuaciones (el paso obvio al considerar una teoría novedosa). Esta vez los dos físicos no se podían quitar unas singularidades que aparecían en las componentes de la métrica y concluyeron que no podría haber ondas gravitacionales. Robertson al estudiar el manuscrito encontró el error típico en relatividad general: el uso de un mal sistema de coordenadas y envió un reporte detallado en el que explicaba por qué las conclusiones eran incorrectas. Einstein, quien no estaba dispuesto a responder al montón de críticas –en cualquier caso erróneas, decía– del árbitro, bastante molesto le escribió al editor diciéndole que él había enviado su artículo a *publicar* y que nunca había autorizado que su manuscrito fuera leído por un tercero antes de ser impreso y retiró el manuscrito y no volvió jamás a publicar en *Physical Review*. El artículo apareció publicado después en *Journal of the Franklin Institute* (Einstein y Rosen, 1937). ¡Había cambiado completamente de contenido y de título! El árbitro estaba en lo correcto, no así Einstein, quien

necesariamente tuvo que reconocer (no públicamente) lo valioso de un arbitraje entre pares.

Entre la comunicación de Tate y la publicación en la otra revista ocurrió que Rosen ya había dejado Princeton y había llegado otro aprendiz para Einstein, Leopold Infeld, y Robertson había regresado de una estancia sabática en Pasadena. Robertson era uno de los cosmólogos más distinguidos y era de los que no podían guardar un secreto como el haber sido el revisor de Einstein. Así que llevó a Infeld por el camino de encontrar el error en los cálculos de Einstein y Rosen sobre las ondas gravitacionales. Infeld entonces comunicó a Einstein el error en los cálculos matemáticos. Einstein, en respuesta, le dijo que él, la noche anterior se había dado cuenta de un error. En esos días tenía ya programada una conferencia en Princeton sobre la existencia de las ondas gravitacionales y un día antes de la conferencia había encontrado el error en sus cálculos. La plática giró en torno a este error y al final concluyó que no estaba seguro sobre la existencia de las ondas.

La clave para salir del embrollo estaba en lo que sugería Robertson (como árbitro y como él mismo), la cual era hacer un cambio de coordenadas para quitarse esas singularidades que no son físicas y que se presentan a menudo con los sistemas de coordenadas. Con el cambio de coordenadas, las singularidades se pasan a donde están las fuentes que originan las ondas gravitacionales, lo cual es físicamente aceptable. Einstein logró hacer las correcciones y el artículo apareció publicado, a principios de 1937, bajo el nombre de *On gravitational waves* (Sobre las ondas gravitacionales) y con la conclusión contraria: ¡sí había ondas gravitacionales!, que fue lo que el árbitro había dicho.

Einstein alguna vez le había dicho a su joven colaborador, Leopold Infeld, quien se preocupaba por revisar cuidadosamente los manuscritos en donde el nombre de Einstein aparecía, que había artículos incorrectos con su nombre. Era un viejito sabio y bonachón bastante cínico.

Finale

¿Por qué tanta confusión con las ondas gravitacionales? Einstein en esos veinte años que pasaron desde que apareció su primer artículo en 1916 cambió de opinión, yendo de “no hay ondas gravitacionales”, “ondas gravitacionales planas pueden ser encontradas”, “las ondas gravitacionales no existen”, “¿existen las ondas gravitacionales?” hasta “entonces parece que existe un solución rigurosa”. Entonces, en concreto la pregunta era: ¿existen las ondas gravitacionales o son descartadas por la relatividad general? El problema estribaba en la complejidad de

los cálculos matemáticos, el mal manejo de los sistemas de coordenadas y con el hecho de que no se conocían objetos o procesos físicos que pudieran producir perturbaciones del espacio-tiempo detectables. Podría ocurrir que se encontraran ondas ficticias o singularidades ficticias por el mal manejo del sistema coordenado usado. Estas ondas ficticias o singularidades resultaron ser *artifact* matemáticos sin realidad física. En el caso de las singularidades, Einstein y Rosen pensaron que si había una singularidad esto era una prueba de que las ondas gravitacionales no podían existir y Robertson cuestionó el mal sistema de coordenadas usado lo que mostró que las ondas sí eran posibles. Pero aún así, a pesar de que sí podría haber ondas gravitacionales quedaba la posibilidad de nunca poder ser detectadas o porque no transportaban energía o no había procesos físicos que pudieran producir señales detectables. Que transportaran energía o no –Rosen proponía que no– fue fácil de responder al mostrar que las ondas podrían provocar la oscilación de partículas de prueba a su paso. Esto hizo Felix Pirani en ese ahora famoso debate de enero de 1957 y que Richard Feynman secundó, no así Hermann Bondi y Thomas Gold, quienes decían que no podrían existir las ondas gravitacionales. Einstein ya había mostrado en 1918 que sistemas estelares binarios radian energía, pero que la energía transportada sería tan pequeña que los cambios en el sistema binario eran imposibles de detectar, lo que no fue el caso con el pulsar binario de Hulse y Taylor Jr. y no será el caso de sistemas binarios formados por agujeros negros que estarán muchísimo más cerca que un sistema binario de estrellas. Los agujeros negros son mucho más masivos, estarán mucho más cercanos entre ellos y se moverán a velocidades altísimas. Pero como Einstein no creía en los agujeros negros pensó entonces que las ondas gravitacionales, a pesar de que la teoría las predecía, serían imposibles de ser detectadas. Por eso, fue decisivo resolver la colisión de dos agujeros negros, lo que ocurrió finalmente en 2005 (Pretorius, 2005; Spherhake, 2015).

De 1957 a 2005 pasaron casi cincuenta años durante los cuales se estudió con más detalle *a)* la teoría de la relatividad general, los sistemas de coordenadas, la física de los agujeros negros, *b)* se desarrolló una nueva área de investigación, la relatividad numérica (Alcubierre, 2008; Spherhake, 2015) y *c)* se estudiaron los posibles escenarios para la posible detección de las ondas gravitacionales y cómo y con qué técnicas podrían ser detectadas.

La década de 2010 comenzó con la mira en los siguientes descubrimientos: detección del bosón de Higgs, descubrimiento de una partícula elemental fuera del modelo estándar de partículas, detección directa de las ondas

gravitacionales, detección directa de la materia oscura, evidencia observacional de inflación en la radiación cósmica de fondo. Dos han sido realizados: el bosón de Higgs fue descubierto en 2012 y las ondas gravitacionales fueron detectadas el pasado 14 de septiembre de 2015. Van dos de cinco y contando.

Con el éxito de LIGO, el experimento eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna) cobra fuerza. Son tres naves espaciales distribuidas espacialmente, las cuales forman un triángulo equilátero con lados de un millón de kilómetros viajando en una órbita heliocéntrica detrás de la Tierra. Los brazos de los interferómetros de LIGO tienen una longitud de 4 km y para aumentar su resolución hay que aumentar su longitud. eLISA es un interferómetro espacial,

una antena triangular con lados enormes. Su lanzamiento está planeado para 2034.

Cuando Albert Abraham Michelson era todavía un adolescente, en 1865, Julio Verne publica *De la Tierra a la Luna*, que después se completa con *Alrededor de la Luna*. Es muy probable que Michelson leyera a Verne, pero es muy improbable que pudiera imaginar que su invento, que usó con Edward Morley para detectar el viento del éter, el interferómetro, podría ser puesto en órbita y en forma de antena gravitacional comenzar a enviarnos las voces de un Universo, lo cual abriría paso a una nueva astronomía basada en las ondas gravitacionales que, a diferencia de las ondas electromagnéticas, cruzan el espacio impunemente sin hacer caso de las estructuras de la materia.



Referencias

- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R., Acernese, F., Ackley, K., [...] Zweizig, J. (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical Review Letters*, 116, 061102.
- Alcubierre, M. (2008). *Introduction to 3+1 numerical relativity*. Oxford: Oxford University Press.
- Alcubierre, M. (2016). *Ondas gravitacionales*. Seminario del Instituto Avanzado de Cosmología. México: Instituto de Física, UNAM.
- Cheng, T. P. (2013). *Einstein's physics*. Oxford: Oxford University Press.
- eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna). Disponible en <https://www.elisascience.org/>
- Einstein, A. (1916). *Approximative integration of the field equations of gravitation*. *Sitzber. K. Preuss. Aka.* 1, 688 (documento 32 en Collected papers of Albert Einstein, 6, english translation supplement).
- Einstein, A. y Rosen, N. (1937). On the gravitational waves. *Journal of the Franklin Institute*, 223, 43.
- GEO600. Disponible en <http://www.geo600.org/>
- Hulse, R. A. y Taylor Jr., J. H. (1975). Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophys. J.*, 195, L51.
- KAGRA (Kamioka Gravitational Wave Detector). Disponible en <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>
- Kennefick, D. (2005). Einstein versus the Physical Review. *Physics Today*, 58(9), 43.
- LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory). Disponible en <http://www.ligo.org>
- López-Cruz, O., Añorve, C., Birkinshaw, M., Worrall, D. M., Ibarra-Medel, H. J., Torres-Papaqui, J. P., Barkhouse, W. A., Motta, V. (2014). The brightest cluster galaxy in A85: the largest core known so far. *Astrophysical Journal Letters*, 795, 2, L31.
- Ohanian, H. C. (2008). *Einstein's mistakes*. New York: W. W. Norton & Company.
- Pretorius, F. (2005). Evolution of binary black-hole spacetimes. *Physical Review Letters*, 95, 121101.
- Rodríguez-Meza, M. A. (2015). *Travesuras cosmológicas de Einstein et al.* Serie de Textos de Astronomía y Astrofísica del Instituto Avanzado de Cosmología. México: Innovación Editorial Lagares.
- Scheel, M. A., Boyle, M., Chu, T., Kidder, L. E., Matthews, K. D. y Pfeiffer, H. P. (2009). High-accuracy waveforms for binary black hole inspiral, merger, and ringdown. *Physical Review D*, 79, 024003.
- Sperhake, U. (2015). The numerical relativity breakthrough for binary black holes. *Classical and Quantum Gravity*, 32, 124011.
- VIRGO. Disponible en <http://www.cascina.virgo.infn.it/advirgo/>
- Weber, J. (1969). Evidence for discovery of gravitational radiation. *Physical Review Letters*, 22, 1320.