

Ondas Gravitacionales: de su predicción a los premios Nobel

Gravitational waves: from their prediction to Nobel Prizes

(Diciembre de 2017)

El nombre de Albert Einstein ha estado llenando nuevamente las principales páginas de periódicos y apareciendo en noticias en los diferentes medios televisivos, y no es para menos, ya que una de sus predicciones -realizada un siglo atrás- ha sido corroborada por primera vez de forma directa en los laboratorios terrestres.

Se trata de la primera detección directa del fenómeno de *ondas gravitacionales*, o si lo llamamos coloquialmente *ondas de espacio-tiempo*, las cuales fueron predichas en 1916, después de que Einstein formulara una de las más revolucionarias teorías en física, conocida como la Teoría General de la Relatividad. Esta describe el comportamiento del campo gravitacional de una forma completamente novedosa, permitiendo ver el fenómeno manifestado en la curvatura del espacio-tiempo. El maravilloso conjunto de ecuaciones de Einstein que describe la gravedad es

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

que, hasta la fecha ha pasado todas las pruebas a los fenómenos gravitacionales con una precisión jamás alcanzada por una teoría para la gravitación. Sin embargo, es necesario mencionar, que la gravitación encuentra en la teoría de Newton, siglos atrás, su primera descripción, y que dicha teoría es una de las grandes obras del pensamiento, pero la Relatividad General nos ha proporcionado el escenario para hablar por primera vez de conceptos como agujeros negros, el Universo y las famosas ondas gravitacionales, entre otros.

Parafraseando al físico John Archibald Wheeler, respecto a las ecuaciones de Einstein: “*la materia le dice al espacio como curvarse*

y el espacio le dice a la materia como moverse, y podríamos añadir, y juntos espacio-tiempo y materia vibran en ondas gravitacionales generando la música del Universo.”

En cuanto a las ondas gravitacionales y ubicarles en un contexto próximo, sabemos que los fenómenos ondulatorios se encuentran en diversidad de situaciones; por ejemplo, las ondas mecánicas de sonido, las ondas electromagnéticas, etc.; pero lo que hace especial a las ondas gravitacionales -que son la solución del conjunto de ecuaciones escritas anteriormente- es que también son soluciones de esa *fábrica de espacio-tiempo*, descrita por el conjunto de ecuaciones de campo de Einstein. En una primera forma muy simple de describirlas, *las ondas gravitacionales son rizos en la curvatura espacio-temporal que se propagan a la velocidad de la luz*, claro, sin ser ondas electromagnéticas, solamente comparten con éstas la velocidad de propagación.

Unas pocas líneas no hacen justicia a este gran campo de las ondas gravitacionales. Es importante mencionar que una vez Einstein predijo que sus ecuaciones soportan soluciones tipo onda, él mismo calculó, haciendo uso de su teoría en el régimen no lineal, las amplitudes de las señales que se esperaban observar, siendo este el nacimiento de los cálculos denominados post-newtonianos, cuya metodología se preserva hasta la fecha. Los primeros cálculos no eran tan alentadores, como en su predicción de la desviación de la luz, los escenarios más propicios para la observación de la radiación gravitacional resultaban ser los fenómenos astronómicos.

En este escenario, cabe resaltar la primera confirmación indirecta de la emisión de ondas gravitacionales realizada por los astrofísicos Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor, utilizando observaciones de de una fuente estelar binaria denominada *púlsar*, descrita en la nomenclatura PSR B1913+16. Su nombre deriva de la emisión periódica de pulsos electromagnéticos, emitidos en diferentes longitudes de onda y con una direccionalidad bien definida. Las detecciones se realizan principalmente en las longitudes de onda de radio. Estos objetos descubiertos en 1967 por Antony Hewish en 1967, y que le merecieron el premio Nobel en 1974, son perfectos

laboratorios para la física gravitacional donde los efectos predichos por la Relatividad General son medibles con gran precisión.

Al observar la variación del periodo orbital del sistema, Hulse & Taylor lograron estimar la potencia emitida en ondas gravitacionales por la fuente. Esta fue la primera corroboración indirecta del fenómeno y también les valió el premio Nobel en 1993.

Es importante anotar que las investigaciones no se limitaron a los fenómenos astronómicos. Intentos como los de Joseph Weber, profesor de física en la Universidad de Maryland en los años 50 - 60, comienzan la empresa para la construcción de instrumentos con miras a detectar la radiación gravitacional producida por distribuciones de masas aceleradas y momentos gravitacionales cuadrupolares no nulos. Esta es la mínima exigencia para que las distribuciones de masa generen patrones de radiación gravitacional. Se podría decir que así se recorren los primeros pasos hacia la ingeniería de antenas gravitacionales. Dichos intentos fracasaron debido a que las señales son demasiado débiles para ser detectadas. Pero la historia de las ondas gravitacionales no se detiene con experimentos como los de Weber. Realizando un salto brusco en la historia, los esfuerzos tanto teóricos como experimentales comenzaron con la apuesta para la detección directa de las ondas gravitacionales.

Uno de dichos intentos es el conocido proyecto LIGO (por sus siglas en inglés: Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory). Entre sus particularidades de dicho proyecto se encuentran dos interferómetros con brazos de longitud de 4km, ubicados en Livingston Luisiana y en Handford en Estados Unidos. LIGO comienza en 1984 con los trabajos pioneros, de entre muchos otros, los profesores Kip Thorne, Rainer Weiss y Bary C. Barish, de la colaboración LIGO/VIRGO, merecedores del premio Nobel en 2017. La detección del pulso de radiación gravitacional realizada por los interferómetros se realizó el 14 de Septiembre de 2015. Este evento es conocido como GW150914.

En este evento, los aparatos registraron un patrón de radiación gravitacional compatible con la coalescencia de dos agujeros negros

de masas aproximadas de $29 M_{\odot}$ y $36 M_{\odot}$ formando un agujero negro de unas $62 M_{\odot}$, lo que significa una liberación de energía de $3 M_{\odot}$ en radiación gravitacional. El rango de frecuencia de la señal se sitúa entre 35 – 250 Hz.

Este colosal hecho ocurrió hace unos 1300 millones de años y su radiación causó un desplazamiento (strain) del orden de 10^{-19} m en los interferómetros. Este maravilloso evento no solo es uno de los hallazgos monumentales en la historia de la física gravitacional, sino que por primera vez las ecuaciones de campo de Einstein son corroboradas en todo su esplendor no lineal en objetos astrofísicos. Además, nos proporciona la primera medida directa de la coalescencia de dos agujeros negros y otorga el reconocimiento a una labor emprendida décadas atrás por los físicos como lo es la solución completa de las ecuaciones de campo utilizando métodos computacionales. Esta rama de vital importancia es conocida como *Relatividad Numérica*. Sin esta importante herramienta no hubiera sido posible interpretar los resultados del LIGO.

El anuncio de la detección de las ondas gravitacionales se realizó el 11 de Febrero de 2016 y desde entonces no paran las sorpresas para este campo. En el presente año se han realizado detecciones de nuevos eventos, entre los cuales se encuentra el patrón de emisión de nuevo de la coalescencia de dos estrellas de neutrones. El fenómeno es conocido como GW170817 y su principal importancia radica en que éste también fue detectado por la astronomía óptica. Fuimos testigos directos de la fusión de estas dos estrellas de neutrones en una nueva estrella denominada *kilonova*. Estos estadios estelares habían sido predichos por la teoría de la evolución estelar mas no observados directamente. Una vez se detectó el patrón de radiación gravitacional, se midió casi simultáneamente una ráfaga de rayos gamma (gamma-ray burst), uno de los eventos más energéticos del universo, en la región del cielo donde la fusión tuvo lugar. Esto abre un enorme campo astrofísico de altas energías. Escenarios para la producción de dichas ráfagas, que únicamente existían en las predicciones teóricas, ahora son corroborados observacionalmente.

Bajo la luz de este nuevo hallazgo, surgen otras inquietantes preguntas que pueden ser resueltas, como el caso de la acreción de

materia alrededor de estrellas masivas y objetos compactos, junto a la producción de los elementos pesados de la tabla periódica. Una visión un poco artística está representada en la figura 1.

Para cerrar esta pequeña nota sobre las ondas gravitacionales, es importante mencionar que la astronomía de las mismas ha dejado de ser ficción y es una realidad. Esta nueva ventana de observación astronómica proporcionará grandes descubrimientos y nos brindará la posibilidad de explorar regiones del universo, como es el caso del universo temprano o los interiores estelares, lo que no ha sido posible mediante las ondas electromagnéticas.

El futuro no se hace esperar, misiones como LISA (Laser-Interferometer Space Antenna), una antena diseñada para detectar ondas gravitacionales en un rango que supera ampliamente las capacidades de LIGO, está en marcha. Este experimento tiene como plan aumentar miles de veces las capacidades de cualquier laboratorio terrestre y será puesto en el espacio. La antena proporcionará no únicamente datos sobre los eventos catastróficos como la fusión de agujeros negros,



FIGURA 1. *Fusión de estrellas de neutrones en gravedad y materia.* [Crédito: Karan Jani / Georgia Tech] (tomada de <https://www.ligo.org/detections/GW170817.php>)

sino que, en principio, de la gran mayoría de las estructuras en el universo y las elusivas ondas gravitacionales primordiales cosmológicas, que se esperan sean detectadas con este experimento.

Referencias

- [1] B. Abbot *et al.*, Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Physical Review Letters* **116**, 061102 (2016).

Dr. rer. nat. Leonardo Castañeda
Profesor asociado
Universidad Nacional de Colombia
Observatorio Astronómico Nacional