



ONDULACIONES EN EL ESPACIO-TIEMPO

... Que las porciones pequeñas de espacio son efectivamente de una naturaleza análoga a la de pequeñas colinas sobre una superficie que es plana en promedio; es decir que las leyes ordinarias de la geometría no tienen validez en ellas.

W. K. Clifford, 1876

ALONSO SEPÚLVEDA S.

I

El 14 de septiembre de 2015, dos grupos de detectores similares, instalados en suelo norteamericano y separados unos ocho mil kilómetros entre sí, vibraron casi al unísono. La duración total del fenómeno fue de solo unos milisegundos y la diferencia entre las detecciones fue de siete milisegundos, lo que permitió, por triangulación, ubicar en el hemisferio sur celeste la fuente de la señal. El hallazgo fue anunciado el 11 de febrero de 2016.

El interferómetro utilizado por cada equipo consta de dos tubos al vacío de cuatro kilómetros de longitud total y en forma de L. Luz láser dividida en dos haces en el ángulo de la L monitorea la distancia entre espejos ubicados en los extremos de los brazos. Cuando una onda gravitacional pasa por el detector, la longitud de cada brazo oscila cambiando su medida en menos del tamaño de un protón (10^{-19} metros), lo que puede ser medido mediante la interferencia de los dos haces de luz. Es el detector de ondas gravitacionales más sofisticado jamás construido. Y son dos observatorios para verificar que las señales vengan del espacio, que no sean vibraciones terrestres, y para determinar la dirección de su fuente.

Según los teóricos, esta señal —nítida y anticipada durante años con cálculos sutiles— se originó en el colapso de dos agujeros negros de masas 36 y 29 la del Sol y ubicados a unos 1.300 millones de años luz de nosotros. Los agujeros giraron uno alrededor del otro durante miles de millones de años y sus órbitas se hicieron cada vez más rápidas hasta que en las fracciones de segundo finales colisionaron a casi la mitad de la velocidad de la luz formando un solo agujero de unas 62 masas solares. En menos de un segundo, y de acuerdo con la ecuación de Einstein $E = mc^2$, cerca de tres veces la masa del Sol fue convertida en radiación gravitacional, en un pulso energético de muy corta duración y mucho más intenso que la luz emitida por todo el universo visible.

Los detectores, uno de ellos ubicado en Livingston (Louisiana) y el otro en Hanford (Washington), fueron diseñados para revelar las oscilaciones de un tipo muy particular de ondas transversas, llamadas ondas gravitacionales, que avanzan en dirección z mientras se estiran x y se encogen en y , y medio ciclo más tarde se encogen en x mientras se estiran en y . Las tres direcciones x , y y z son perpendiculares. El que se estira y se encoge es el propio espacio, lo que se traduce en la oscilación de las distancias. Esta particularidad las diferencia limpiamente de una onda electromagnética, en la que un par de campos eléctrico y magnético oscilan en direcciones perpendiculares entre sí y a la dirección de su propagación, sin que el espacio sufra las deformaciones que son específicas de las ondas de espacio-tiempo. Las ondas electromagnéticas son ondas en el espacio, las gravitacionales son ondas *de* espacio, su naturaleza es geométrica.

El espacio-tiempo es el nuevo escenario en el que ocurren los fenómenos del mundo; su concepto fue inaugurado en la relatividad especial en 1908 por Hermann Minkowski, y puede concebirse como la fusión de las antiguas nociones newtonianas de espacio y tiempo.

II

La teoría general de la relatividad, fruto de ocho años de trabajo, fue presentada por Einstein ante la Academia Prusiana de Ciencias el 25 de noviembre de 1915. El artículo correspondiente apareció en el número 49 de la revista *Annalen der Physik* en marzo de 1916. El año anterior, Einstein había explicado el giro anómalo de la elipse del planeta Mercurio, conocido como precesión del perihelio, y había previsto la curvatura de la trayectoria de la luz debida a masas, que sería confirmada por Arthur Eddington en el eclipse total de Sol de 1919. La relatividad general es una teoría geométrica de la gravitación que reemplaza a la teoría newtoniana fundamentada en la noción de fuerzas gravitacionales; la teoría de Einstein es una rama de la física teórica dedicada al estudio de las propiedades del espacio-tiempo bajo diversas distribuciones de materia. En esta teoría, el movimiento de los planetas no se debe a fuerzas generadas sobre los planetas por el Sol, sino a la distorsión de la geometría del espacio-tiempo

generada por el Sol. Se trata ahora de movimientos libres, sin fuerzas, en espacio-tiempo curvos.

En el mismo año 1916, Einstein predijo la existencia de las ondas gravitacionales, que no son más que oscilaciones del espacio-tiempo debidas a materia acelerada. Desde ese momento, diversas fuentes posibles de estas ondas fueron analizadas y pronto se descubrió que su detección tendría dificultades técnicas tal vez insuperables. Fueron de tanto alcance que solo cien años después de su postulación fueron detectadas en forma directa.

En los años sucesivos, Einstein y otros científicos realizaron desarrollos que enriquecieron las predicciones de la reciente teoría. En 1917, Karl Schwarzschild, un matemático asignado por Alemania al frente ruso durante la Primera Guerra Mundial, resolvió sin aproximaciones —y casi en el campo de batalla— las ecuaciones de Einstein, lo que le permitió evaluar en forma exacta la precesión del perihelio de Mercurio y obtener la solución de las ecuaciones que en los años sesenta se llamarían *agujeros negros*: una extraña distorsión extrema del espacio y el tiempo causada por una masa esférica superconcentrada, que atraparía toda forma de materia que entrase un poco más allá de lo que se llamó el *horizonte de sucesos*, o radio de Schwarzschild. Desde los años sesenta, los agujeros negros han estado en la mira de los astrofísicos teóricos y de los astrónomos observacionales, quienes creen haberlos localizado en lugares tan particulares como el centro de las galaxias.

Por su parte, los estudiosos de la evolución de las estrellas han encontrado que los agujeros negros son una de sus fases terminales posibles. Han descubierto la posibilidad de parejas extrañas en el cielo formadas por estrellas de neutrones, púlsares (estrellas de neutrones con altas rotaciones), supergigantes rojas, enanas blancas y agujeros negros.

III

Puesto que el espacio interestelar es de un alto vacío —y, como el sonido, solo se propaga donde hay materia—, el colapso de los agujeros negros es un cataclismo colosal que ocurre sin estruendo en el perfecto silencio del espacio profundo y en una casi completa oscuridad interrumpida solo por esa luz de ciegos de los rayos X y gammas, en el centro de cuyos halos ocurre la ceremonia. Un colapso

remoto e inaudible, sin la conflagración luminosa de una explosión. Para un observador lejano como nosotros hay, sin embargo, una novedad sin igual en la experiencia física y es un *temblor de espacio* que se propaga en forma de onda; no solo es un fenómeno que ocurre *en el espacio* sino algo que le ocurre *al espacio*, acaecer no previsto en la física newtoniana. Este acontecimiento singular, la distorsión del espacio, de la geometría del espacio, está acompañado de una singular distorsión en el flujo del tiempo, solo posible porque el tiempo es blando, maleable, deformable por la materia. Como creeríamos verlo en un cuadro de Dalí.

Esta perturbación gravitacional, consistente en la oscilación de longitudes y duraciones —impensable en la física anterior a 1900—, es el nombre corriente para una alteración periódica del espacio-tiempo en la que una de sus constantes estructurales —el número p — danza al ritmo de la melodía silenciosa que surge de las espirales del colapso de los agujeros negros. En cercanías del lugar del colapso, p es a veces 3,14, a veces 3,1415, a veces 3,13, porque la onda es una alteración periódica de la geometría. La distorsión ondulatoria de p y de las propiedades del espacio y el tiempo se propaga en la oscuridad y a la velocidad de la luz. Estas fueron las ondulaciones detectadas en Livingston y Hanford.

Son como ondas sísmicas sin materia ordinaria, solo con espacio y tiempo, ondas que afectan solo el tejido del espacio-tiempo.

IV

En la teoría de Maxwell, una elaboración que comenzó con el estudio de los experimentos de Faraday con imanes en movimiento y corrientes eléctricas que varían en el tiempo, surgió la idea de una onda de electricidad y magnetismo, una entidad novedosa en la época, equivalente en esencia a la luz y a los rayos X, a los ultravioletas e infrarrojos. Esta idea fue probada por Hertz cuando produjo en su laboratorio chispas con las frecuencias de las ondas de radio que fueron enseguida detectadas al otro extremo del recinto.

Estas ondas viajan a la misma velocidad de la luz sin necesidad de materia circundante, pueden moverse atravesando los líquidos, el aire y los cristales, y viajar en el vacío casi perfecto del espacio interestelar, donde alcanzan su máxima velocidad.



Para un observador lejano como nosotros hay, sin embargo, una novedad sin igual en la experiencia física y es un *temblor de espacio* que se propaga en forma de onda; no solo es un fenómeno que ocurre *en el espacio* sino algo que le ocurre *al espacio*, acaecer no previsto en la física newtoniana.

Cerca a esta época, William Kingdom Clifford soñaba con que la materia en movimiento alteraba la curvatura del espacio en forma tan elegante como los delfines la de las aguas del mar. Tal vez la gravitación sería solo la huella que deja en su paso la materia sobre el espacio, tal vez es el espacio mismo alterado, rizos en el espacio y el tiempo, como las suaves estelas que el viento traza en la superficie de un agua tranquila.

Variantes de estas ideas fueron propuestas por Bernard Riemann, el creador de la geometría que le permitió a Einstein repensar la gravitación.

V

Según la teoría, nada sale de los agujeros negros, ni la luz, ni las partículas que hayan caído en el interior del horizonte de eventos, pero sí pueden hacerlo las ondas gravitacionales, que en fin de cuentas son solo espacio y tiempo ondulantes, y el agujero negro es eso, espacio-tiempo con una gran masa puntual en su centro. Por esta razón, las ondas gravitacionales podrían ser utilizadas para estudiar la geometría interna de los agujeros negros. Estas ondas permitirían chequear la validez de la teoría en zonas de distorsiones intensas del espacio y estudiar la distribución y las masas de las más lejanas galaxias. Por esto se considera que la detección realizada en Livingston y Hanford es el inicio de la astronomía de ondas gravitacionales, que abre una ventana análoga a lo ocurrido cuando la astronomía basada en la luz dio paso a la astronomía de rayos X, gammas infrarrojos, ultravioletas y radioondas. La astronomía ha encontrado una nueva manera de compilar información sobre el cosmos.

VI

Un precedente notable de la detección de 2015 es el estudio del sistema binario descubierto y estudiado por Russell Hulse y Joseph Taylor desde 1975; se le llama PSR1913+16 y consta de una pareja púlsar-estrella de neutrones, en la cual el período orbital del púlsar decrece a lo largo de los años al ritmo previsto por la relatividad general y en perfecto acuerdo con la emisión predicha de ondas gravitacionales, aunque nunca involucró una detección directa de tales ondulaciones. El período orbital se reduce en unas siete cien milonésimas de segundo en cada vuelta (un segundo cada trece mil años) como lo predice la relatividad general.

Los dos cuerpos viajan en apretadas espirales y con alta velocidad, dirigiéndose al punto de su colapso. Este sistema binario es un laboratorio natural de relatividad general, pues los dos cuerpos se mueven a unos mil km/s, su distancia mutua es cercana a un diámetro solar, y las masas son de un Sol y medio concentradas en esferas de unos diez km de diámetro. Estos cuerpos chocarán en unos 300 millones de años, repitiendo a menor escala lo detectado por los interferómetros en 2015.

VII

Los púlsares son emisores de ondas gravitacionales de baja frecuencia que pueden ser detectadas por instrumentos en tierra; para emisiones de frecuencias moderadas a altas, se proyectan para los próximos decenios detectores en órbita o en diferentes puntos del sistema solar. De este modo, se espera acceder a la observación de eventos cósmicos catastróficos e invisibles, pues la generación de ondas de espacio-tiempo es un fenómeno discreto, sin el derroche luminoso ni la pirotecnia de la explosión de las supernovas.

Los teóricos creen que los colapsos de agujeros negros pueden proveer las mejores señales gravitacionales periódicas. De la teoría de evolución estelar y del conteo de galaxias, puede concluirse que la frecuencia de estos colapsos debe ser muy baja. Las cuentas anuncian que podría haber una colisión de dos agujeros negros por galaxia cada mil años. Si consideramos el cúmulo de galaxias de Virgo, el más cercano cúmulo rico en galaxias (unas tres mil), ubicado a unos 60 millones de años luz, podrían ocurrir allí unos seis colapsos por año.

No es difícil que estas detecciones puedan realizarse con frecuencia en un universo tan vasto, si se cuenta con las mejoras que vendrán en los telescopios gravitacionales, los primeros de los cuales fueron ya instalados en Livingston y Hanford. ■

Alonso Sepúlveda S. (Colombia)

Físico de la Universidad de Antioquia. Realizó estudios de posgrado en el Hunter College de Nueva York. Desde 1990 ha sido investigador del Centro Internacional de Astrofísica de la Universidad Sapienza de Roma. Ha publicado, entre otros, *Estética y simetrías*, *Un viaje en espacio y en el tiempo*, *El instante luminoso* y *Bases de astrofísica*.