

ONDAS GRAVITATORIAS: UNA REVOLUCION EN COMO MIRAMOS AL UNIVERSO

Jorge Pullin

*Center for Gravitational Physics and Geometry
The Pennsylvania State University
University Park, PA 16802-6300, USA*

Ondas gravitatorias

La mayoría de los físicos notamos una gran analogía entre el campo gravitatorio y el campo electromagnético. Cuando en los cursos introductorios se cubre la electrostática, la analogía con el caso gravitatorio es total. Dicha analogía también existe, aunque no se suele discutir en cursos introductorios, en el caso de campos dinámicos. La analogía no es completa, ya que los campos gravitatorios dinámicos son descritos por la teoría de la relatividad general, que es una teoría no lineal más complicada que la que describe la electrodinámica. Sin embargo, también existen elementos análogos a nivel dinámico. En particular, así como en el campo electromagnético existen ondas que viajan a la velocidad de la luz y son capaces de transmitir energía e información entre dos puntos distintos, esto también es posible con el campo gravitatorio. Las ondas involucradas, llamadas ondas gravitatorias, son, en efecto, predichas por la teoría de Einstein. Sin embargo, nunca han sido observadas experimentalmente. Dos elementos conspiran para esto. En primer lugar, la gravedad es una interacción muy débil. Todos hemos hecho el experimento de levantar pedazos de papel atraídos por una regla de material plástico que frotamos contra una tela (o nuestro cabello). En este caso la regla de plástico cargada provee una atracción electromagnética sobre los pedazos de papel que logra doblar a la atracción gravitatoria de un planeta entero (la

Tierra). El segundo elemento que hace que las ondas gravitatorias sean débiles es que son de naturaleza cuadrupolar. Así como en el campo electromagnético las ondas son de naturaleza dipolar, en el caso gravitatorio hay que ir un orden más para tener propagación (esto tiene que ver con que no existen dipolos gravitatorios, dado que no hay masas negativas). Así es que no podemos construir un experimento de Hertz gravitatorio. Para producir cantidades apreciables de ondas gravitatorias hay que acelerar grandes cantidades de masa. Esto sólo ocurre en eventos astronómicos.

Si son tan difíciles de detectar ¿por qué hay interés en las ondas gravitatorias? Porque son una herramienta muy útil para *mirar* al universo. Cuando los astrónomos miran al cielo, como lo han hecho desde tiempo inmemorial, en realidad lo que hacen es detectar ondas electromagnéticas que vienen del universo. Más precisamente, las ondas electromagnéticas son producidas en las superficies de los objetos astronómicos por átomos pertenecientes a gases a alta temperatura. Esta última distinción vale la pena hacerla, porque ilustra cuán parcializada es nuestra visión del universo. Nosotros no vemos los objetos astronómicos, vemos su superficie. Un objeto astronómico podría tener violentos procesos internos que, si no modifican la temperatura de la superficie, serían invisibles a un astrónomo. La situación mejora dramáticamente si uno usa ondas gravitatorias. En dicho caso, las ondas no son producidas por átomos en la superficie de un objeto, sino que son producidas por los movimientos de la masa de un objeto, pero mientras las ondas electromagnéticas son fácilmente apantalladas o dispersadas, las ondas gravitatorias sólo responden a movimientos coherentes de grandes cantidades de masa. Es como si este tipo de ondas se *correlacionara* mejor con lo que realmente nos interesa del universo e ignorara lo irrelevante.

Los proyectos experimentales

Aun cuando son producidas por cantidades astronómicas de masa, las ondas gravitatorias son difíciles de detectar. Para detectar

ondas gravitatorias uno simplemente debe colocar un par de masas que pueden moverse libremente. Cuando una onda pase entre ellas, las mismas se moverán. Por ejemplo, si dos agujeros negros chocan más allá del cúmulo de Virgo, el desplazamiento relativo que produciría en dos masas en la tierra sería de 10^{-22} . Esto es, si tomamos dos masas y las ponemos, digamos, a 4 km de separación, una onda gravitatoria como las esperadas las movería menos del tamaño del radio de un protón. Aun así, experimentalistas en EEUU, Francia, Italia, Alemania, Escocia y Japón, están construyendo *telescopios* capaces de detectar estas ondas. El principio de funcionamiento de estos detectores se basa en un interferómetro de Michelson con espejos colgados como péndulos. Al pasar una onda gravitatoria los espejos se mueven y las franjas del interferómetro se corren. En EEUU el llamado Proyecto LIGO [1] está construyendo dos de estos interferómetros de 4km de largo, uno en el estado de Washington, el otro en Louisiana. El proyecto está completo en un 90 % y se espera que los dos interferómetros produzcan datos *en coincidencia* dentro de dos años.

Las fuentes de ondas [2]

Los tipos de evento astronómico que se espera poder detectar con esta clase de interferómetros se pueden catalogar en tres categorías:

1. eventos cataclísmicos, como la explosión de una supernova;
2. colisión de objetos astronómicos masivos, como estrellas neutrónicas o agujeros negros;
3. pulsares (estrellas neutrónicas rotantes) que desarrollen algún tipo de inhomogeneidad.

Las supernovas son candidatos ideales para producir ondas gravitatorias, si se desarrollan asimétricamente. Objetos con simetría

esférica no pueden producir ondas gravitatorias (ni electromagnéticas, ya que no tienen momentos dipolares ni cuadrupolares). Existe gran incertidumbre acerca de qué tan asimétricas son las supernovas. Por ello es difícil predecir que tan observables serán. Esto sin considerar lo impredecibles que son.

Las colisiones de objetos compactos son mucho más predecibles. Basta estimar su abundancia para concluir que, eventualmente, pares de estos objetos terminarán bajo atracción gravitatoria mutua y producirán una colisión. La estimación de cuántas colisiones de este tipo ocurren es difícil, dado que, a ciencia cierta, conocemos muy pocos pares binarios de estrellas neutrónicas y ninguno de agujeros negros. Por ende, todo cálculo es una gran extrapolación.

Finalmente, objetos que rotan, como pulsares, que son estrellas neutrónicas rápidamente rotantes, emitirían ondas gravitatorias si desarrollan irregularidades. Así como la tierra posee terremotos y montañas, los mismos ocurren en estrellas neutrónicas. Cuando una estrella desarrolla una *montaña*, la misma es una irregularidad que al rotar provee un momento cuadrupolar cambiante en el tiempo y por ende radía gravitatoriamente. Obviamente, hay mucho que aprender en geología de estrellas neutrónicas, y por ello no es bien conocido qué tan común es este fenómeno.

El desafío teórico

Un elemento para destacar es que debido a lo delicada de la medición que se lleva a cabo para detectar ondas gravitatorias, muy posiblemente la señal a detectar sea comparable (o quizá menor) que el ruido de los interferómetros. Los interferómetros tienen ruido debido a efectos sísmicos, a efectos térmicos en la suspensión de los espejos y (a altas frecuencias) al efecto shot de la luz. Si la señal a detectar es menor que el ruido, la misma se puede detectar, si uno conoce su forma *a priori*. Si la señal a detectar es desconocida, la detección se complica. De ahí que estos experimentos proveen un gran desafío para los teóricos que trabajan en gravitación: el

predecir con precisión qué tipo de formas de onda gravitatoria se van a observar.

En particular, se están realizando grandes esfuerzos para calcular la forma de onda producida por la colisión de dos agujeros negros. Los agujeros negros son sistemas muy *limpios* (todo lo que hay en su interior es invisible a un observador externo, se comportan como las venerables *partículas puntuales* de los cursos de física elemental). Aun así, estudiar la colisión es un asunto complicado, pues uno debe resolver las ecuaciones de la teoría de la relatividad general para el espacio-tiempo dinámico de la colisión. Dichas ecuaciones son ecuaciones no lineales a derivadas parciales. En ese sentido se parecen a las ecuaciones de la hidrodinámica (por ejemplo, Navier-Stokes) pero poseen una serie de características que hacen su integración numérica más difícil. Por ejemplo, el hecho de que el dominio computacional queda definido por el problema mismo. Esto se refiere a que cuando uno resuelve el espacio-tiempo de un agujero negro, el interior del mismo no es observable. Qué es el interior y qué es el exterior del agujero negro, depende del espacio-tiempo en cuestión, pero esto es justamente lo que uno está tratando de resolver. Esto, junto a la natural complejidad de las ecuaciones (que tienen miles de términos) termina haciendo la tarea altamente compleja. Actualmente varios grupos están haciendo esfuerzos en esta dirección [3], pero el estado del arte actualmente sólo permite evolucionar el espacio-tiempo por tiempos muy cortos (aproximadamente cien veces menos de lo necesario). Se esperan progresos en los próximos años, especialmente dado el constante avance de la industria de la computación.

Alternativamente, otros grupos [4] han estado intentando técnicas aproximadas para estudiar el problema. Un enfoque que ha sido bastante exitoso estudia los momentos finales de la colisión como un solo agujero negro distorsionado y supone que las distorsiones son pequeñas. Esto permite resolver en forma aproximada las ecuaciones, usando la aproximación linealizada. Resultados bastante interesantes acerca de la física de las colisiones se han obtenido a través de esta aproximación.

Conclusión

En suma, estos son tiempos muy interesantes para la gente que trabaja en gravitación: existe un desafío técnico para físicos experimentales que conlleva un desafío teórico. El resultado de esto puede llevar a una revolución en la manera cómo miramos al universo, posiblemente sólo comparable a cuando Galileo apuntó un telescopio por primera vez al cielo. En los próximos años, cuando los detectores entren en operación, se espera una intensa actividad en la que teoría y experimento irán mano a mano barriendo el universo, utilizando una nueva forma de luz: la gravedad misma.

1. <http://www.ligo.caltech.edu>
2. <http://www.tapir.caltech.edu/~hughes/ASIS/sourcelist.html>
3. <http://www.astro.psu.edu/users/nr>
4. <http://xxx.lanl.gov/abs/gr-qc/9803005>