

para dejarla regresar. Una vez observado lo anterior, se empuja la pelota pequeña de modo que salga del plano. Los alumnos deben apuntar lo observado y explicar.

- Dos pelotas de la misma magnitud se hacen girar una alrededor de la otra, como en el caso del pulsar, y se observa. Además, se puede generar una onda si se estira el extremo de la tela y se suelta. Aquí es donde representamos las ondas gravitacionales.

#### Desarrollo

Esta experiencia trata sobre la fuerza gravitacional. Según Einstein, la fuerza gravitacional es una deformación del espacio-tiempo. Con espacio-tiempo se refiere a un medio que tiene cuatro dimensiones, dentro de ellas están las tres dimensiones del espacio (X,Y,Z) y el tiempo; este medio es el que compone al Universo.

El plano formado por la red en el bastidor representa sólo dos dimensiones del espacio al que se refiere Einstein, y las pelotas son las masas presentes en el espacio, dos cuerpos cualesquiera, planetas, personas, etcétera.

El plano formado por la tela tensa es el espacio-tiempo en dos dimensiones, que no tiene ninguna masa cerca. Se observa una cuadrícula uniforme.

Un cuerpo que tenga masa crea una deformación en el espacio-tiempo alrededor suyo. La tela se hundirá alrededor de la pelota, en la medida en que la masa de la pelota la tense.

La deformación del espacio-tiempo de un cuerpo con determinada masa puede alterar la trayectoria de otros cuerpos de menor magnitud.

Cuando la pelota pequeña se deposite en el plano, tenderá a rodar hasta la pelota de mayor masa; será fácil, entonces, relacionar este fenómeno con la forma en que somos atraídos por la Tierra: cuando saltamos nos separamos por un momento pero regresamos a la superficie.

Si la pelotita es empujada con más fuerza sale del plano; aquí se puede discutir la velocidad de escape.

Cuando se intenta que la pelotita lleve una trayectoria rectilínea, ésta es desviada en dirección de la pelota de mayor masa, siendo alterada por la deformación que produce. Si esto último se hace con cuidado, es posible lograr que la pelotita orbite alrededor de la pelota de mayor masa y que eventualmente, por la fricción, la pelotita termine en el centro con la otra pelota. Será fácil relacionarlo con el movimiento planetario. ¿Entonces por qué la Luna no se acerca a la Tierra?

Cuando los dos cuerpos de masa grande giran uno en torno al otro generan deformaciones que se propagan en el plano; esto es una representación de las ondas gravitacionales en dos dimensiones.

Pero, ¿qué pasa con el tiempo, lo estamos deformando? No, en esta experiencia no deformamos el tiempo, pero podríamos imaginarlo. El tiempo alrededor del cuerpo es alterado por la fuerza gravitacional y si pudiéramos medir el tiempo cerca del cuerpo éste iría más despacio que el tiempo en un espacio sin masas cerca.

### VI. Bibliografía

Tipler, *Física*, Editorial Reverté, 1994.

Alonso-Finn, *Física*, Addison-Wesley Iberoamericana, México, 1995.

*Agradecemos la colaboración de Mariana Esquivel-zeta en la elaboración de esta guía.*

Esperamos sus comentarios y sugerencias, que pueden hacer con atención a: Rosa María Catalá, al teléfono 56 22 72 97, fax 54 24 01 38, correo electrónico [comoves@universum.unam.mx](mailto:comoves@universum.unam.mx)

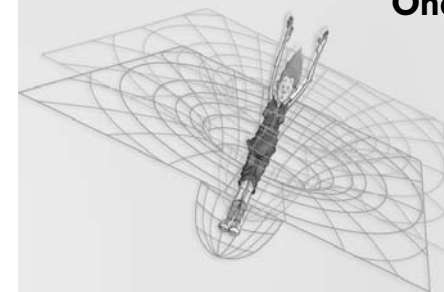
Los profesores pueden copiar esta guía para su uso en clase. Para cualquier otro uso es necesaria la autorización por escrito del editor de la revista.



## Ondas de espacio, ondas de tiempo LA BÚSQUEDA DE LA RADIACIÓN GRAVITACIONAL

De: Miguel Alcubierre

(No. 68, p. 10)



#### Maestros:

Esta guía se ha diseñado para que un artículo de cada número de *¿Cómo ves?* pueda trabajarse en clase con los alumnos, de modo que se adapte a los programas de ciencias naturales y a los objetivos generales de estas disciplinas a nivel bachillerato. Esperamos que la información y las actividades propuestas sean un atractivo punto de partida o un novedoso "broche de oro" para dar un ingrediente de motivación adicional a sus cursos.

#### I. Relación con los temarios de bachillerato UNAM

Esta guía puede ser utilizada por maestros de física, química y matemáticas de manera simultánea o por separado, ya que en el artículo de referencia se habla de los tipos de radiaciones y el comportamiento de la materia, en especial de las radiaciones gravitacionales y cómo se ha dado su estudio.

#### II. Un poco más sobre las ondas gravitacionales

Hasta el momento, casi todo lo que sabemos acerca del Universo lo hemos aprendido observando la luz, en todas sus formas. Disponemos de múltiples y diferentes tipos de telescopios —en la Tierra y en el espacio— para observar las diversas longitudes de onda en el espectro

electromagnético. Pero el Universo está repleto de "sonidos" que nunca hemos podido oír; de hecho, podríamos aprender mucho más acerca del Universo si pudiésemos detectar las ondas gravitacionales. Y aunque en el artículo se describen este tipo de ondas con claridad, una explicación más simple primero y otra un poco más compleja después, esperamos con esta guía facilitar la comprensión del mismo.

Aunque todos sentimos los efectos de la gravedad, ésta es todavía la fuerza más misteriosa del Universo. De acuerdo con las explicaciones de Albert Einstein en su teoría de la relatividad, los objetos causan la curvatura del espacio que los rodea. Los objetos grandes, como el Sol, curvan el espacio a su alrededor mucho más que los pequeños, y los objetos que se mueven por el espacio siguen dicha curvatura. Cuando el espacio tiene una curvatura lo suficientemente pronunciada —como aquella alrededor del Sol— los planetas, asteroides y cometas que se desplazan a lo largo de la curva, están en órbita. Si no fuera por la curvatura del espacio, todos ellos se desplazarían en línea recta, alejándose del Sol. Y, en realidad, de esto se trata la gravedad. Si las masas curvan el espacio, entonces las masas muy grandes que se desplazan rápidamente por él son capaces de crearle ondulaciones. Es así como Einstein predijo la existencia de las ondas gravitacionales, como si fueran ondulaciones en un

gran estan-  
que cósmico donde

—como lo especifica el autor del artículo de referencia—, las ondas gravitacionales más grandes serían causadas por sucesos enormes, por ejemplo, dos estrellas inmensas en órbita entre sí, o una estrella enorme que gira alrededor de un agujero negro, o dos agujeros negros en órbita entre sí.

### III. La teoría de Einstein y sus alcances

Profundizando un poco en la teoría, ésta establece que la gravedad se propaga con una velocidad finita e igual a la de la luz. El propio Einstein, después de su predicción de 1916 sobre la existencia de las ondas gravitacionales, publicó un artículo con el cálculo de la energía que emitiría en forma de ondas gravitacionales algún objeto celeste. Este cálculo se resume en una fórmula similar a la que determina la energía que emite en ondas electromagnéticas un sistema de cargas, aunque con un par de diferencias importantes. Además de que la fuerza gravitacional es intrínsecamente más débil que la electromagnética, una diferencia física importante entre ambas radica en que mientras existen cargas positivas y negativas, no existen (hasta donde sabemos) masas negativas. Como resultado no es posible construir el análogo gravitacional de una simple antena de radio y la emisión (y detección) de ondas gravitacionales es intrínsecamente un proceso más ineficiente que el de emisión (y detección) de ondas electromagnéticas.

En su artículo de 1918, Einstein consideró la emisión de ondas gravitacionales debida a estrellas como el Sol en rotación alrededor de su propio eje o en sistemas binarios, concluyendo la imposibilidad de detectar esta radiación gravitacional. Por más de medio siglo las ondas gravitacionales no pasaron de ser un ejercicio intelectual, hasta el descubrimiento de las estrellas de neutrones y los hoyos negros. En 1973 Joseph Taylor y Robert Hulse descubrieron el pulsar binario PSR 1913+16, constituido por dos estrellas de neutrones rotando una alrededor de la otra cada

seis horas. Después de algunos años de, literalmente, “tomarle el pulso” a este objeto, Taylor y Hulse pudieron demostrar que el periodo orbital disminuye muy lentamente, pero en acuerdo perfecto con la fórmula de Einstein, trabajo que les valió el premio Nobel. Además de constituir la evidencia más firme de que la relatividad general es la descripción correcta de la gravitación, el estudio de PSR 1913+16 indica indirectamente que este objeto emite ondas gravitacionales. Es el único objeto celeste para el que podemos estimar de manera confiable cuánta energía gravitacional es emitida y la posibilidad de detectarla. Desafortunadamente, es casi seguro que la emisión de PSR 1913+16 está por debajo del umbral de registro de los detectores de ondas gravitacionales en desarrollo.

Sin embargo, no todo está perdido: dentro de 200 millones de años la órbita de este sistema de estrellas de neutrones se habrá reducido tanto que éstas chocarán en un evento cataclísmico, del tipo que creemos produce los enigmáticos estallidos de rayos gamma descubiertos en los años setenta. En unos cuantos segundos las dos estrellas se desgarrarán entre sí y PSR 1913+16 emitirá una enorme cantidad de ondas gravitacionales, que podrán detectarse con instrumentos como los que pronto estarán en funcionamiento. Si bien ni nosotros ni nuestros lectores podremos atestiguar este evento, las estimaciones recientes del número de pulsares binarios y de la emisión de ondas gravitacionales durante el choque de estrellas de neutrones sugieren la viabilidad de detectar uno de estos sistemas en los próximos 10 o 20 años. Existe aún mucho camino por recorrer, tanto en el desarrollo de detectores de ondas gravitacionales como en el cálculo de la energía liberada durante el choque de estrellas de neutrones entre sí y con hoyos negros, para tener una idea realista de las características que deben tener estos detectores. Aunque el

panorama no es tan alentador como quisiéramos, hay confianza en que durante el siglo XXI se iniciará el estudio de fuentes celestes de ondas gravitacionales.

### IV. Otros posibles proyectos

Sabemos ya que las ondas gravitacionales que provienen incluso de sucesos cósmicos descomunales son muy débiles cuando nos llegan desde algún sistema estelar lejano, al igual que un sonido fuerte que está muy lejos nos puede parecer muy tenue. Queda claro que es muy difícil detectar las ondas gravitacionales; por eso todavía no se han podido medir. Cuando finalmente sea posible hacerlo será como oír al Universo por primera vez, cuando hasta ahora sólo hemos podido *mirarlo* por medio de las ondas electromagnéticas. Entre las formas más avanzadas (e inclusive en proyecto) para *cazar* ondas gravitacionales se encuentran (además de las comentadas en el artículo de referencia) las siguientes:

**Observación de neutrinos:** Hasta ahora la única detección de neutrinos de algún objeto celeste aparte del Sol fue la de 19 neutrinos provenientes de la supernova SN1987A, primera prueba directa de que las supernovas se producen por el colapso de estrellas de neutrones.

**La antena espacial por interferometría láser** (*Laser Interferometer Space Antenna*, LISA, por sus siglas en inglés) es una misión espacial capaz de detectar algunas de estas ondas gravitacionales, como si se tratara de un enorme micrófono astronómico. Si la NASA (y antes que la NASA, el gobierno de los Estados Unidos) decide pagar la misión, ésta sería lanzada alrededor del año 2010 y junto con los observatorios ubicados en Tierra, representaría la mejor manera de localizar ondas gravitacionales, así como

el radiotelescopio espacial Hubble representa la mejor manera de *ver* el Universo hasta ahora.

**La misión consistiría en que LISA colocara tres naves espaciales en órbita alrededor del Sol, detrás de la Tierra. Las tres naves estarían a una distancia de cinco millones de kilómetros entre sí, moviéndose en una formación triangular. Cuando pasara cerca una onda gravitacional, estas ondulaciones del espacio desplazarían suavemente las naves una distancia pequeñísima. Sin embargo, los rayos láser extraordinariamente sensibles que conectarían las tres naves (como si fuera una telaraña hecha de rayos luminosos) permitirían medir este movimiento minúsculo. ¿Llegaremos a *escuchar* los resultados por medio de proyectos como LIGO o LISA? Sólo el tiempo podrá decirlo.**

### V. Experiencia: la fuerza gravitacional

#### Material

- 1 red flexible o tela
- 1 bastidor (un ula-ula, o dos palos)
- 1 regla
- 1 plumón
- 2 pelotas de masas diferentes (tenis y ping pong)

#### Procedimiento

- Se construye con el bastidor y la red un plano tenso; sobre la red se habrán trazado líneas para seccionar el área. Una vez tenso se coloca la pelota de mayor masa en la tela y se pide a los alumnos que describan lo que observan y lo expliquen.
- Después se coloca la pelota de menor masa sobre la tela, alejada de la primera pelota, y se suelta.
- Se lanza la misma pelotita, intentando conseguir una trayectoria recta a través del plano.
- Se pide a los alumnos que expliquen y anoten lo observado.
- Se empuja suavemente la pelota pequeña para separarla de la de mayor masa, sólo