

La velocidad de la gravitación

Rafael Ferraro

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA.

La Relatividad General (Einstein, 1915) es la teoría relativista del campo gravitatorio. Según Einstein los fenómenos gravitatorios no provienen de una fuerza de interacción entre masas, como enunciara Newton, sino que resultan de las propiedades geométricas que las distribuciones de masa u otros tipos de energía confieren al espacio-tiempo. En este enfoque, la órbita de un planeta alrededor del Sol no se debe a la fuerza que este ejerce sobre aquel, sino que es el movimiento natural (inercial) del planeta en un espacio-tiempo *curvado* por la masa del Sol. Además de describir con mayor precisión aquellos fenómenos gravitatorios ya comprendidos en el modelo newtoniano, la Relatividad General, como teoría acerca de la geometría del espacio-tiempo, abarca aspectos tales como la formación de agujeros negros (*singularidades* del espacio-tiempo), la producción de ondas gravitatorias (perturbaciones de la geometría del espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz), y aplicaciones en cosmología.

La Relatividad General ha sido confirmada por una gran variedad de experimentos. Una de las primeras pruebas fue la observación en 1919 de la deflexión de la luz de una estrella que es vista próxima al borde del disco solar (ver 'La demostración sudamericana de las teorías de Einstein', CIENCIA HOY, 44: 50-59, 1998). Según la Relatividad General, la trayectoria de un rayo de luz deja de ser rectilínea cuando recorre la vecindad del Sol u otro astro porque debe ceñirse a la curvatura del espacio-tiempo impresa por el astro. La deflexión de la luz afecta la visual a la estrella y se manifiesta entonces como una alteración de la posición normal de la estrella en la bóveda celeste (aquella que la estrella tiene cuando el astro responsable de la deflexión ocupa otro lugar del cielo). El efecto es similar al que produce la refracción de la luz cuando un objeto sumergido en un estanque es observado desde afuera del mismo. La Relatividad General enseña que la luz de una estrella que es vista en dirección rasante al disco solar se desvía 1,75 segundos de arco.

La deflexión gravitatoria de ondas electromag-

Un experimento busca la huella dejada por la velocidad de propagación del campo gravitatorio en la deflexión gravitatoria de señales de radio emitidas por cuasares.

néticas ha sido comprobada con precisión creciente desde fines de la década del 60 mediante la observación de objetos celestes que emiten en longitudes de onda de radio. Las fuentes de radio son preferibles a las fuentes luminosas porque la determinación de sus posiciones en el firmamento ha sido notablemente mejorada a través de la radio-interferometría. En esta técnica se combinan dos o más radiotelescopios para establecer la dirección de procedencia de una señal de radio a partir de la diferencia de tiempos de llegada de la señal (*desfase*) a cada uno de ellos. La determinación de la dirección de la señal es tanto más precisa cuanto más separados están los radiotelescopios, por lo que conviene disponer de bases separadas por distancias de escala planetaria.¹ Esta *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) permite medir la separación angular de dos cuasares lejanos con un error menor a 0,1 milisegundos de arco. La VLBI se aplica también en geodesia y en determinaciones de alta precisión de la orientación del globo terrestre.

La VLBI ha sido utilizada para observar la deflexión de señales de radio de fuentes extragalácticas en el campo gravitatorio solar; el valor medido coincide con el valor previsto por la Relatividad General dentro de un margen de error de 0,1% [1]. También ha sido reportada la observación con VLBI de la deflexión de señales de radio en el campo gravitatorio de Júpiter, aunque con un importante margen de error de 50% [2]. Los márgenes de error han sido mejorados a partir de un tratamiento estadístico de más de dos millones de datos recogidos con VLBI entre 1979 y 1999 [3].

Los permanentes avances en la técnica de VLBI han alentado a los científicos a medir efectos más finos de la gravedad sobre las señales electromagnéticas. Las mediciones realizadas hasta ahora confirman el efecto que el campo gravitatorio es -

tático de un cuerpo esférico tiene sobre una onda electromagnética. Sin embargo, el movimiento del cuerpo causante de la deflexión también interviene en las leyes relativistas que gobiernan el fenómeno. La Relatividad General enseña que el cambio de posición de un cuerpo no se traduce instantáneamente en el cambio de su campo gravitatorio; el campo gravitatorio se adecua a la nueva posición del cuerpo después de transcurrido un tiempo que es proporcional a la distancia al cuerpo. Este efecto de *retardo* se debe a que el campo gravitatorio se propaga con velocidad *finita* (la misma velocidad con que lo hace la luz). El profesor Sergei M Kopeikin, quien trabaja actualmente en la Universidad de Missouri-Columbia, estudió la forma en que el retardo afecta a la deflexión gravitatoria de ondas electromagnéticas en las condiciones típicas del campo gravitatorio en el ámbito del sistema solar. Kopeikin obtuvo que el

efecto es tan tenue que solo podría detectarse llevando la técnica VLBI al límite de sus posibilidades actuales [4]. Para acometer esa empresa, Kopeikin se unió con el profesor Edward B Fomalont, un radioastrónomo del *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO) quien ya había utilizado la técnica de VLBI para medir la deflexión de señales de radio en el campo gravitatorio del Sol [5]. Juntos decidieron aprovechar la alineación de la Tierra, Júpiter y el quasar J0842+1835 ocurrida el 8 de septiembre de 2002, día en que Júpiter pasó a solo 3,7 minutos de arco del quasar. En esas condiciones la deflexión debida al campo gravitatorio estático de Júpiter es de 1,26 milisegundos de arco en la dirección radial, mientras que el retardo agrega tan solo 53 microsegundos de arco en la dirección del movimiento de Júpiter [6]. Para comparar la línea de visión al quasar con las de otros quasares no afectados por la gravedad de Júpiter, y observar así la deflexión, Fomalont y Kopeikin utilizaron el VLBA (*Very Large Baseline Array*), que es una combinación de 10 radiotelescopios de 25m pertenecientes al NRAO y distribuidos a lo ancho del territorio estadounidense desde Hawai hasta las Islas Vírgenes, en combinación con el radiotelescopio de 100m del Max-Planck-Institute für Radioastronomie localizado en Effelberg (Alemania). Fomalont y Kopeikin [6] explican que 'el propósito primario de nuestro experimento es... observar directamente el efecto de retardo en la propagación del campo gravitatorio en el sistema solar...' 'Creemos que... podemos medir el efecto de retardo en la propagación de la gravedad y determinar la velocidad de propagación con un margen de error de 10% a 20%.' El procesamiento de los datos obtenidos estará terminado a fines de 2002. Al mismo tiempo, y de manera independiente, otros grupos de la NASA y Japón realizaron sus propias mediciones que serán cotejadas con las de Fomalont y Kopeikin.



Rafael Ferraro: Doctor en Física, UBA.
Investigador independiente del CONICET.

Referencias

1. ROBERTSON DS, CARTER WE y DILLINGER WH, 1991, 'New measurement of solar gravitational deflection of radio signals using VLBI', *Nature* 349, 768-770; LEBACH DE, COREY BE, SHAPIRO II, RATNER MI, WEBBER JC, ROGERS AEE, DAVIS JL y HERRING TA, 1995, 'Measurement of the solar gravitational deflection of radio waves using very-long-baseline interferometry', *Phys. Rev. Lett.* 75, 1439-1442.
2. TREUHAFT RN y LOWE ST, 1991, 'A measurement of planetary relativistic deflection', *Astron. J.* 102, 1879-1888.
3. EUBANKS TM, MARTIN JO, ARCHINAL BA, JOSTIES FJ, KLIONER SA, SHAPIRO S, y SHAPIRO II, 1999, 'Advances in solar system tests of gravity'. (ftp://casa.usno.navy.mil/navnet/postscript/prd_15.ps).
4. KOPEIKIN SM y SCHÄFER G, 1999, 'Lorentz covariant theory of light propagation in gravitational fields of arbitrary-moving bodies', *Phys. Rev. D* 60, 124002 (1-44); (<http://xxx.lanl.gov/abs/gr-qc/9902030>). KOPEIKIN SM, 2001, 'Testing the relativistic effect of the propagation of gravity by Very Long Baseline Interferometry', *ApJ* 556, L1-L5; (<http://xxx.lanl.gov/abs/gr-qc/0105060>).
5. MUHLEMAN DO, EKERS RD y FOMALONT EB, 1970, 'Radio interferometric test of the general relativistic light bending near the sun', *Phys. Rev. Lett.* 24, 1377-1380.
6. KOPEIKIN SM y FOMALONT EB, 2002, 'General relativistic model for experimental measurement of the speed of propagation of gravity by VLBI', *Proceedings of the 6th European VLBI Network Symposium*, Bonn, Ross, E. et al. (eds.), (<http://xxx.lanl.gov/abs/gr-qc/0206022>).

¹ El satélite HALCA, lanzado en 1997, lleva un radiotelescopio que permite extender la VLBI a escalas tres veces más grandes que las alcanzables por los sistemas terrestres.