

CIEN AÑOS DEL ESPACIO-TIEMPO CURVO

ALONSO SEPÚLVEDA S.

El 25 de noviembre de 1915, Albert Einstein presentó a la Academia Prusiana de Ciencias, con sede en Berlín, un manuscrito de cuatro páginas en el que consignaba la versión definitiva de su Teoría General de Relatividad, una construcción físico-matemática en la que había trabajado con tesón desde 1907.

En ese año Einstein había elaborado las primeras ideas que lo condujeron a postular la equivalencia entre los efectos físicos que ocurren en un sistema de referencia acelerado y en un campo de gravitación. Este resultado, que Einstein calificó como “el pensamiento más feliz de mi vida”, cimentó lo que desde entonces se conoce como *principio de equivalencia* y es el primer paso en su intento de generalizar su Relatividad Especial, la teoría propuesta en 1905 que alteró los fundamentos de la física con sus nuevas nociones de espacio y tiempo.

La Relatividad Especial consistió en una revisión de las ideas newtonianas sobre el espacio y el tiempo; de acuerdo con Newton, las propiedades del espacio son absolutas, vale decir, inalteradas por la presencia de la propia naturaleza. El espacio, tridimensional, es además euclidiano, infinito y continuo. El tiempo, por su parte, es infinito, divisible sin límite y transcurre de un modo uniforme e inalterado por la materia del mundo.

En 1905, Einstein llegó a la conclusión, por razones experimentales, de que el escenario en el que se desarrollan los acontecimientos del mundo tiene cuatro dimensiones, y que el espacio y el tiempo están inextricablemente relacionados, hasta el punto de que las medidas de las longitudes de los cuerpos y la duración de los acontecimientos están conectados entre sí y dependen del estado de movimiento del observador. Esto dio pie para que Planck —el creador de la teoría cuántica— llamara Relatividad a esta nueva teoría. El nuevo escenario se conoce ahora como espacio-tiempo o espacio de Minkowski, por el apellido de quien le dio su status matemático en 1908.

Ahora bien, la teoría de la relatividad plantea un escenario en el que los sistemas de referencia utilizados están, unos respecto a otros, en movimiento uniforme, sin que la noción de reposo absoluto tenga algún sentido; en cada uno de ellos, contradiciendo elementales reglas del sentido común newtoniano, la velocidad de la luz tiene el mismo valor de 300.000 kilómetros por segundo. Los sistemas de referencia así descritos son conocidos como inerciales, y la teoría que a ellos se refiere es la relatividad restringida o especial.

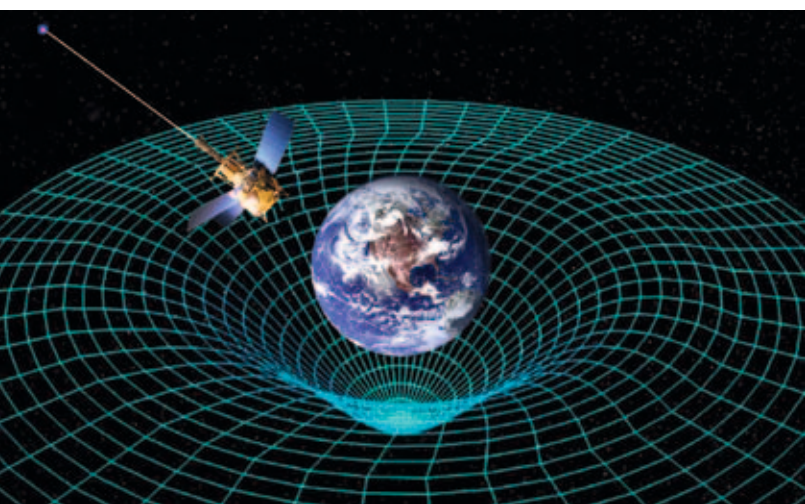
En los años siguientes a 1905, Einstein se planteó el problema de diseñar una teoría válida para sistemas de referencia con aceleración, vale decir, para sistemas no inerciales. En estos, como en un vagón con aceleración o un tiovivo en rotación, surgen efectos peculiares que se repiten con las mismas características en los campos gravitacionales, como en cercanías de la superficie terrestre. Es en este contexto donde surge en 1907 el principio de equivalencia que le permite a

Einstein realizar una primera predicción: la luz sigue trayectorias curvas que han de ser observables en la cercanía de grandes masas como el Sol. Este efecto sería corroborado en un eclipse total de Sol en 1919.

Lo verdaderamente sorprendente es que la equivalencia de los sistemas acelerados y los campos de gravitación exige que una teoría de los sistemas acelerados sea a la vez una nueva teoría de la gravitación que sustituya la antigua y eficiente teoría newtoniana. Esta exigencia complicó los esfuerzos de Einstein, hasta tal punto que solo en 1912 dio el siguiente paso esencial al descubrir que la gravitación está asociada a la deformación de la geometría propuesta en la Relatividad Especial. El proyecto se llama ahora Relatividad General y ha de ser a la vez una teoría *geométrica* de la gravitación. Resulta entonces que el espacio-tiempo es curvo y que en vez de la geometría de Minkowski es necesario introducir la geometría curva de Riemann en cuatro dimensiones.

Con la ayuda de su amigo y discípulo, Marcel Grossmann, Einstein propuso en 1913 el primer bosquejo de una teoría geométrica de la gravedad. Múltiples dificultades matemáticas y físicas hicieron que el último paso diera sus frutos en noviembre de 1915, en una serie de cuatro escritos que culminaron en el informe del 25 del mismo mes.

¿De qué trata este artículo? De la exposición de una teoría en la que el espacio-tiempo es una estructura flexible de cuatro dimensiones, escenario natural de los fenómenos físicos, cuyas propiedades geométricas están determinadas por el contenido energético del espacio-tiempo. La energía en cualquiera de sus formas,



En el espacio-tiempo curvado por el Sol se mueven los planetas siguiendo las líneas más cortas en cuatro dimensiones que, proyectadas en un plano, son elipses que giran lentamente. Este descubrimiento exige reformular la ley newtoniana de inercia en espacios curvos.

masa, presión, esfuerzos, campos de diversos tipos, calor, es fuente de la distorsión del espacio-tiempo. Vale decir que la gravitación deja de ser, como en Newton, un fenómeno de fuerzas debidas a masas, para convertirse en una distorsión de la geometría causada por las diversas formas de la energía presentes en el mundo.

En el espacio-tiempo curvado por el Sol se mueven los planetas siguiendo las líneas más cortas en cuatro dimensiones que, proyectadas en un plano, son elipses que giran lentamente. Este descubrimiento exige reformular la ley newtoniana de inercia en espacios curvos.

Las consecuencias de la Relatividad General son múltiples y han sido corroboradas por diversas mediciones astronómicas y en tierra. Algunas de ellas son: los planetas

en su movimiento orbital alrededor del Sol presentan un pequeño giro de su elipse conocido como precesión del perihelio, descubierto inicialmente en el movimiento de Mercurio; la luz se desvía en presencia de masas, efecto observado en el eclipse de Sol de 1919; la luz cambia de frecuencia al caer en un campo de gravitación, efecto probado por Pound y Rebka en 1959; una predicción notoria es la existencia de los agujeros negros, regiones del espacio-tiempo con distorsiones extremas de la geometría y que parecen residir en el centro de muchas galaxias; y una más: las ondas de espacio y tiempo conocidas como ondas gravitacionales, que aún esperan ser detectadas.

Los localizadores GPS, basados en múltiples satélites en órbita, exigen para su funcionamiento tomar en cuenta los efectos que sobre la marcha de los relojes tienen la gravitación y el movimiento.

La cosmología moderna contiene una de las más novedosas aplicaciones de esta teoría, según la cual la expansión del universo anunciada por Hubble en 1929 no es otra cosa que la expansión del espacio que —según los últimos descubrimientos— podría extenderse de modo indefinido, llevando al universo entero a diluirse en los siguientes miles de millones de años en un espacio infinito.

La Relatividad General es la teoría de más alta estética creada por un solo individuo; es comparable, en su exquisita unidad, en su profundidad e íntima belleza, a la novena sinfonía de Beethoven o a la Capilla Sixtina. ■

Alonso Sepúlveda S. (Colombia)

Físico de la Universidad de Antioquia con estudios de posgrado en Hunter College de Nueva York. Investigador del Centro Internacional de Astrofísica de la Universidad Sapienza de Roma de 1990 a 2010. Ha publicado, entre otros, *Estética y simetrías*, *Un viaje en el espacio y en el tiempo*, *El instante luminoso*, *Los conceptos de la física* y *Bases de astrofísica*.