

## *energética*

---

# Teoría de la relatividad general, 100 años

En 1905, Albert Einstein propuso la teoría de la relatividad especial y, en 1915, la teoría de la relatividad general. En la primera, unificó al espacio-tiempo de cuatro dimensiones. En la segunda, el espacio-tiempo se ve deformado por la masa y la gravedad es una consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo. La cosmología moderna se basa en las ecuaciones de campo de Einstein. La teoría ha resistido todas las pruebas y tiene diversas aplicaciones. Para los trabajadores de la energía, esta teoría tiene importancia con relación a las transformaciones de materia y energía, y la dinámica del electrón.



La Sonata K-378 de W. A. Mozart fue interpretada al violín por A. Einstein

### Introducción

Con la Teoría de la Relatividad Especial (1905) Einstein introdujo cambios profundos en la manera de entender al universo. El espacio es el lugar donde ocurren los eventos y el tiempo es una cuarta dimensión del mismo. El espacio y el tiempo son

propiedades de existencia de la materia en movimiento, son variables dinámicas, no existen separadas y no tienen significado idéntico para los observadores que se mueven uno respecto del otro. Einstein unificó al espacio-tiempo de cuatro dimensiones (ver 2005, *energía*, v5, n58-70, FTE, México).

En la teoría del movimiento de Newton aparece la masa como la propiedad que determina cómo acelerar un objeto cuando se le aplica una fuerza. Newton también descubrió una ley que determina a la fuerza de gravedad en presencia de otro objeto a través de la masa. Para Einstein, la estructura del espacio-tiempo se ve deformado por la masa y reacciona en presencia de materia de energía.

La Teoría de la Relatividad General (1915) es una teoría geometrodinámica en la cual, la materia dice al espacio-tiempo como curvarse y el espacio-tiempo dice a la materia como moverse (ver Misner C. W., Thorne K. S., Wheeler A. 1973, *Gravitation*, Freeman, New York).

Según la teoría de la relatividad general, las propiedades geométricas no son independientes sino condicionadas por la materia. No es posible inferir

nada sobre la estructura geométrica del mundo a menos que la reflexión se funde en el conocimiento del estado de la materia.

La teoría de la relatividad de Einstein ha sido probada exitosamente desde el principio. Ambas teorías, especial y general, tienen diversas aplicaciones prácticas y permiten explicar una variedad de fenómenos físicos que van desde el efecto fotoeléctrico a los agujeros negros, lentes y ondas gravitacionales. La cosmología moderna está basada en las ecuaciones de campo de Einstein. Hoy es posible un universo curvo y con dimensiones adicionales.

Nuestro conocimiento de la naturaleza no es definitivo sino aproximado. Hay teorías cosmológicas no estándar pero la teoría de Einstein sigue vigente y ha resistido todas las pruebas u observaciones a gran escala (para un conocimiento de las grandes obras de Einstein, ver Hawking S. 2008, *La Gran Ilusión*, Crítica, Barcelona).

Hoy se trabaja en la unificación de las fuerzas fundamentales de la naturaleza en una sola estructura del espacio-tiempo en un universo expansión, pero la gravedad sigue pendiente de ser comprendida a cabalidad.

La expansión del universo está demostrada teórica y observacionalmente. Más aún, hoy se sabe que el universo no solo se expande, sino que está en aceleración y que la fuerza que hace esto posible se debe a la *energía oscura*, cuya naturaleza se desconoce, que cubre todo el espacio y produce una presión negativa que tiende a acelerar la expansión del universo, resultando en una fuerza gravitacional repulsiva. Para explicar esta aceleración se ha vuelto a considerar en los modelos cosmológicos la existencia de una constante (cosmológica) originalmente introducida por Einstein y, luego, suprimida por él mismo.

En 2015, la teoría de la relatividad junto con la teoría cuántica, son las teorías físicas básicas en que se basan los conocimientos actuales sobre el universo.

## Relatividad especial y general

Se llama relatividad por el principio de relatividad. Este, establecido por Galileo Galilei, es un principio de relatividad del movimiento, todo movimiento es relativo respecto a un sistema de referencia. La teoría de la relatividad considera que los sucesos (o eventos) de la naturaleza ocurren en el espacio y el tiempo y son relativos al estado de movimiento del

2015, *energía* 15 (326) 11, FTE de México observador. De hecho, cualquier movimiento debe entenderse conceptualmente como un movimiento *relativo*.

Para explicar el significado de la relatividad nadie mejor que el propio Einstein (ver Einstein A. 1956, *The Meaning of Relativity*, Princeton, New Jersey; Einstein A. 1999, *Sobre la Teoría de la Relatividad Especial y General*, Alianza, Madrid).

La teoría de la relatividad de Einstein surgió de la teoría electromagnética y de la óptica, y cristalizó a partir de la teoría de Maxwell-Lorentz de los fenómenos electromagnéticos.

La teoría de la relatividad está relacionada con la teoría del espacio y el tiempo.

En un artículo publicado en 1911. "Fundamento de la teoría general de la relatividad", Einstein explicó el primer postulado de la teoría de la relatividad especial, según el cual, las leyes de la física son válidas para todos los observadores en cualquier sistema de referencia. El segundo postulado es la constancia de la velocidad de la luz en el vacío. Esta teoría se aplica al caso de ausencia de un campo gravitacional. El dominio de la relatividad especial es el espacio plano.

Esta teoría estaba incompleta al no considerar la gravedad, requería una extensión que llevó a una teoría de la gravitación. La gravitación se introdujo porque cambiando el sistema de coordenadas se puede producir un campo gravitacional. La geometría del espacio-tiempo es afectada por la materia. En presencia de materia el espacio-tiempo no es plano sino curvo, percibido como campo gravitacional. Esto es, la gravedad es una consecuencia de la curvatura de la geometría del espacio-tiempo.

El principio de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío también debe ser modificado, pues, su trayectoria es curvilínea no rectilínea. Einstein argumentó que el universo debía ser curvo y no solo el espacio se curva sino también el tiempo. La misma luz se curva en presencia de cuerpos masivos. Se requirió, entonces, un requisito de covariancia para las ecuaciones que expresan las leyes generales de la naturaleza.

Esto necesitó de nuevas matemáticas para la formulación de las ecuaciones covariantes, como los cuadvectores y cálculo de tensores; también se utiliza el cálculo variacional, la geometría diferencial y el cálculo de variedades.

En el artículo "Consideraciones cosmológicas sobre la teoría general de la relatividad", publicado en 1917, Einstein explicó las

2015, energía 15 (326) 12, FTE de México inconsistencias de la teoría newtoniana y como superar esas dificultades. Para ello, introdujo una modificación a la teoría newtoniana del potencial mediante una constante ( $\lambda$ ). Esta constante, incorporada en las ecuaciones de campo gravitacionales, era compatible con el postulado de relatividad y con la experiencia derivada "del sistema solar".

Según Einstein, en la concepción teórica del universo real, la curvatura del espacio-tiempo es variable en el tiempo y el lugar según la distribución de materia. La *constante cosmológica* ( $\lambda$ ) era necesaria con el objetivo de hacer posible una distribución cuasiestática de la materia.

La curvatura del universo no es necesariamente local. La forma del universo puede ser plano, cerrado como una esfera y, por tanto, finito o abierto, como una silla de montar y, por tanto, infinito. Recientes observaciones de la radiación de microondas de fondo sugieren que el universo es "plano" o tan extenso que todavía no se puede confirmar su planitud.

Los resultados del satélite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) (en Spergel D.N. et al. 2003, *Astrophysical Journal Supplement Series* 148, 175) indican que el universo está formado por un 73% de *energía oscura* (cuya naturaleza se desconoce) y 27% de materia. De ésta, el 23% es *materia oscura* (cuya naturaleza se desconoce), el 3.5% es materia ordinaria no luminosa y solamente un 0.5% es materia visible en forma de estrellas y galaxias, gas y polvo. La densidad cosmológica es de 1.02, es decir, un universo *plano* como el predicho por la teoría de la *inflación* (ver 2005, energía 5 (70) 50-53, FTE, México).

La teoría general de Einstein predecía un universo no estático, la atracción gravitacional implicaba que el universo debía estar expandiéndose o contrayéndose. Para equilibrar la atracción gravitacional y mantener estático al universo fue que introdujo la *constante cosmológica*.

Cuando en 1922, Edmund Hubble observó la expansión del universo, lo que era consistente con la teoría original de Einstein pero no con la constante, Einstein retiró su *constante cosmológica*, misma que hace unos años ha vuelto al descubrirse que el universo no solo está en expansión sino también, en aceleración y que esto ha sido por la presencia de la *energía oscura* que podría explicarse mediante modelos con *constante cosmológica* en las ecuaciones de campo de Einstein. Las

observaciones de explosiones de supernovas distantes indican que esa constante existe.

En 1922, A. Friedman obtuvo una solución para las ecuaciones de campo de Einstein. Utilizando la métrica de Robertson-Walker son posibles diversas geometrías de universo en expansión (o contracción), homogéneo e isótropo. Otras métricas permiten soluciones que explican el colapso gravitacional de una estrella o masa esférica, así como, distintos tipos de agujeros negros, en equilibrio o en rotación.

Desde 1919 se consideraba que la gravitación tiene importancia en la constitución de las partículas elementales de la materia. Esto, en palabras de *David Bohm*, forma parte de la *dialéctica del kosmos*, pues, lo más grande se explica por lo más pequeño y viceversa. La cosmología y las partículas elementales tienen amplia relación. La interacción de la fuerza gravitacional ocurriría mediante el intercambio de *gravitones*, emitidos como ondas gravitacionales que viajan a la velocidad de la luz.

## Alcance de la teoría

El 25 de noviembre de 1915, Einstein presentó su teoría de la relatividad general, ante la Academia Prusiana de Ciencias, en Berlín. En 1919, Arthur Eddington comprobó durante un eclipse una de las predicciones de Einstein sobre la desviación de la luz por un cuerpo masivo. Durante ese eclipse, las expediciones midieron la posición de las estrellas junto al Sol oscurecido y, efectivamente, las posiciones variaban tal como lo había predicho Einstein.

Las grandes masas del universo, como una galaxia, pueden curvar la luz de objetos que se encuentran por detrás, muy distantes, y aumentarla como una lupa. A este fenómeno se le llama lentes gravitacionales.

Los relojes funcionan más lentos cuando están junto a un campo gravitacional fuerte. "Esto es tan extremo que el tiempo casi se detiene junto a un agujero negro" (Nicolai H., Dpa, en *La Jornada* en línea, 24 noviembre 2015). En el campo gravitatorio de la Tierra este efecto es tan pequeño que en el día a día no lo notamos. Pero en cambio es fundamental para la sincronización de los satélites de navegación y hay que corregirlo, de lo contrario las posiciones no son correctas.

En los 60's-70's se descubrieron cuerpos celestes exóticos muy distantes, cuyas

características particulares se podían explicar con la teoría de Einstein. Por ejemplo los agujeros negros y el hecho de que su enorme campo gravitacional no refleja la luz. Hawking ha sido uno de los grandes estudiosos del tema. (ver Hawking S. 1993, Agujeros Negros y Pequeños Universos, Crítica, Barcelona; Hawking S., Ellis G.F. 1991, The Large Scale Structure of Space-Time, Cambridge, London).

Los agujeros negros, el Big Bang, o la constante expansión del universo se pueden explicar con la teoría de la relatividad general.

### Algunas aplicaciones

Algunas de las aplicaciones de la teoría de la relatividad son (en prodigy.msn.com/es-mx):

*Energía nuclear*- El conocimiento de la estructura del núcleo atómico y la equivalencia entre masa y energía, son la base de la energía nuclear. Su principal aplicación pacífica es la generación nucleoelectrónica. Mal utilizada la tecnología también sirve para las aplicaciones militares mediante la manufactura de armas nucleares.

*Gas licuado del petróleo (LP)*- La licuación de gas a líquido, por la reducción de los niveles moleculares de energía, que permite comprimir y transportar al gas LP fue posible a partir del *movimiento browniano* de Einstein que permitió comprender el movimiento aleatorio de las partículas suspendidas en un fluido.

*Motores para cohetes*- La licuefacción de los combustibles, tales como, hidrógeno y oxígeno hacen que tengan menos volumen.

*Sistema de posicionamiento global (GPS)*- Los efectos de la relatividad se manifiestan en estos sistemas, pues, sus componentes (espacial, de control y de usuario) están en un marco de referencia diferente. El primero se refiere a los satélites que se colocan en órbitas específicas, el segundo, es una estación a la que se envían los datos satelitales, el tercero es quien usa el sistema. Los tres componentes son necesarios para que el GPS

2015, energía 15 (326) 13, FTE de México funcione con precisión. Los relojes deben estar sincronizados. Debe tomarse en cuenta el campo gravitacional de la Tierra, así como, los efectos de la teoría en el satélite.

*Puertas automáticas*- Los fotosensores emiten un haz de luz y, cuando algo bloquea a esta, las puertas se abren automáticamente. Esta es una consecuencia inmediata del *efecto fotoeléctrico*.

*Cámaras digitales*- En estos dispositivos, la luz se absorbe y canaliza hasta un sensor con pequeños fotolitos (píxeles) sensibles a la luz. Cuando esta llega a los píxeles, los electrones son liberados generando una imagen. El principio es el mismo *efecto fotoeléctrico*.

*Lector de código de barras*- Con base en el mismo principio, los códigos de barras reciben la luz reflejada en fotoceldas sensibles a la luz.

### Epílogo

En México la teoría se estudia muy poco, para la generalidad sigue siendo ignorada; salvo excepciones, en las universidades casi no se estudia.

Para los trabajadores de la energía es muy importante conocer la teoría de la relatividad de Einstein, específicamente, con relación a las transformaciones de materia y energía y con la dinámica del electrón.

La teoría general de la relatividad propone la idea de que las masas eléctricas de un electrón se mantienen unidas por fuerzas gravitacionales. Junto con la teoría cuántica es posible explicar muchos fenómenos. La energía (materia) está hecha de electrones y quarks. La energía eléctrica es un flujo de electrones, las partículas más elementales, que se mueven a la velocidad de la luz, son relativistas.

Materia, energía, relatividad, cuantos de luz, están en la esencia de nuestra materia de trabajo en las industrias energéticas y de telecomunicaciones. Conocer su epistemología e implicaciones es parte de nuestra lucha en el espacio del saber.

El FTE de México se congratula de celebrar al profesor Albert Einstein en el centenario de la Teoría de la Relatividad General.