

2005, 100 años de la Teoría Especial de la Relatividad

Teoría General de la Relatividad

- El espacio-tiempo es curvo, no existen sistemas preferidos de coordenadas.
- La gravedad deforma al espacio y éste le dice a la materia como moverse.
- La materia reacciona sobre el espacio y le dice como curvarse.
- La teoría general de la relatividad describe al universo en su conjunto.
- El universo está en movimiento y en expansión.

Las “fuerzas” de la naturaleza

La Teoría Especial de la Relatividad, formulada por Albert Einstein en 1905, estaba incompleta. La aceleración debida a la gravedad no se consideraba. Entonces, en 1915, Einstein propuso incluirla.

La llamada “fuerza” gravitacional ha sido motivo de estudios durante, al menos, 300 años. Antes de Einstein, destacan los trabajos de Newton. En la actualidad se considera que las “fuerzas” o interacciones fundamentales de la naturaleza son 4, a saber, las interacciones *gravitacional*, *electromagnética*, *nuclear fuerte* y *nuclear débil*. Las primeras 2 son de largo alcance y, las otras dos, son de corto alcance.

Eso quiere decir, que las interacciones gravitacional y electromagnética se manifiestan a grandes distancias, tanto a escalas locales como de todo el universo en su conjunto. La gravitación se debe a la existencia de la masa de los cuerpos y, la electromagnética, a la existencia de cargas eléctricas. Las interacciones de corto alcance se manifiestan a nivel subatómico o nuclear, en distancias muy cortas. La fuerza nuclear fuerte es la que mantiene unidos a los protones y neutrones en

el interior del núcleo atómico y, la fuerza nuclear débil, es la responsable de la radiatividad beta.

Hace algunos años, la fuerza electromagnética y la nuclear débil fueron unificadas por la teoría *electro-débil* de S. Weinberg y A. Salam, de manera que existen ya solamente 3 fuerzas fundamentales. Grandes esfuerzos se hacen en el área de la cromodinámica-cuántica, o teoría del color de los quarks, para unificar también a la fuerza *nuclear fuerte*. Desde hace tiempo, el objetivo ha sido unificar a todas las fuerzas en una sola, a través de las Teorías de Gran Unificación (TGU), pero no ha sido posible.

La presencia de las “fuerzas” se manifiesta en los campos: gravitacional, electromagnético y nuclear (fuerte y débil). Las interacciones ocurren a través del intercambio de partículas asociadas con cada campo. En el caso electromagnético los responsables de las interacciones son los fotones, es decir, la radiación electromagnética como la luz. En el caso de la gravedad son las ondas gravitacionales.

La gravitación, no obstante haber sido conocida mucho tiempo ha, y ampliamente estudiada, es tal vez la menos entendida de las fuerzas de la naturaleza.

Faltaba incluir a la gravedad

En la Teoría Especial de la Relatividad (TER), propuesta por Einstein en 1905, la gravedad no había sido tomada en cuenta, de hecho no se consideraba la aceleración de los cuerpos. Esto era porque, la TER es una teoría restringida a marcos de referencia locales, por eso se llama especial o restringida. Un marco local de referencia significa basarse en sistemas inerciales. Pero en el universo no existen sistemas inerciales, esa es una simplificación. Para considerar un marco no-local, esto es, sistemas no-inerciales, era necesario generalizar la teoría. Por ello, en noviembre de 1915, Einstein propuso su Teoría General de la Relatividad (TGR).

La TGR es una teoría de la gravitación. En relatividad todas las formas de energía son equivalentes a la masa, de manera que, de acuerdo a la TGR, la gravedad debe contener a todas las formas de energía como fuentes del campo gravitacional.

El espacio-tiempo es curvo

Einstein introdujo el concepto de espacio curvo y, la TGR es, entonces, una teoría geométrica de la gravitación o geometrodinámica. El espacio curvo es lo que permite explicar a la gravedad. Esta no ocurre porque sea una “fuerza” que nos jala. Se dice, por ejemplo, que el peso de los cuerpos se debe a que la gravedad “jala”, a esos cuerpos, hacia el centro de la Tierra y, eso, es lo que nos mantiene unidos a la superficie terrestre en vez de andar “flotando” por los aires sin control. Eso es parcialmente cierto. Pero no es que exista esa fuerza que nos “jala”. Lo que ocurre es que los cuerpos, debido a su masa, curvan el espacio y eso da lugar a diferentes manifestaciones incluida la percepción del peso de los cuerpos.

Desde Copérnico, Galileo y Kepler se sabe que la Tierra gira alrededor del Sol. Antes de Einstein se creía que los planetas giraban alrededor del Sol debido a la “fuerza” gravitacional que el Sol ejercía sobre los distintos cuerpos planetarios. Pero lo que ocurre es que el Sol, que tiene una masa enorme comparada con los planetas, “deforma” al espacio, lo curva, precisamente debido a su gran masa. El espacio “deformado” obliga a los planetas a girar alrededor del Sol.

La TGR describe la deformación del espacio-tiempo creada por el Sol y cualquier otro objeto masivo, como una estrella en explosión o un agujero negro.

La gravedad desvía a la luz

Uno de los experimentos que Einstein propuso para apoyar su teoría consiste en medir la desviación de la luz por un cuerpo masivo como el Sol.

Todo empezó al imaginar qué pasaría si el Sol desapareciera súbitamente. De acuerdo a Newton, se sentiría la pérdida inmediata de la gravedad del Sol. Pero, de acuerdo a Einstein, eso no ocurriría instantáneamente porque las interacciones instantáneas, a velocidad infinita, no son posibles. Las únicas interacciones posibles son *finitas* y tienen como límite la velocidad de la luz.

La distancia de la Tierra al Sol es aproximadamente de 150 millones de kilómetros y la velocidad de la luz es de 300 mil kilómetros por segundo. Dividiendo la distancia entre la velocidad resulta que la luz que sale del Sol tarda en llegar a la Tierra 8 minutos. Entonces, la Tierra tardaría ese tiempo en responder a la “súbita” desaparición del Sol, no antes porque nada hay más rápido que la velocidad de la luz.

Como la gravedad no es la que empuja a la Tierra alrededor del Sol sino que éste deforma al espacio alrededor de él, es el espacio curvado el que hace mover a la Tierra alrededor del Sol. Lo mismo ocurre con la luz, ésta es desviada al pasar cerca de un cuerpo masivo como consecuencia de la deformación del espacio creada por ese objeto de gran masa.

El 19 de mayo de 1919, hubo dos eclipses de Sol visibles en el norte Brasil y en la costa oeste de Africa. En Sobral, Brasil, y en la Isla Príncipe, el eclipse fue observado no obstante que, en el sitio africano llovió escasos minutos antes. Allí estuvo Arthur Eddington quien tomó algunas fotografías y midió la desviación de la luz al pasar cerca del Sol.

Observando la posición de una estrella, resultaba que ésta se veía en dos posiciones como si se moviera. En realidad la estrella tenía la misma posición pero, debido a que el Sol distorsiona el espacio, la estrella parecía moverse. Se comprobó, entonces, que el Sol podía desviar a la luz como lo había predicho Einstein. Eddington presentó su informe a la Real Academia de Ciencias de Inglaterra. Al siguiente día, Einstein entró a la celebridad. El 7 de noviembre de 1919, el diario

Times publicó en sus titulares “Revolución en la ciencia”, “Nueva teoría del universo”.

El colapso de las estrellas

Cuando un cuerpo tiene una masa muy grande, como las estrellas masivas, al evolucionar aumenta su densidad. Los cuerpos muy densos deforman completamente al espacio, lo “desgarran” y se dice que colapsan. El espacio-tiempo de esos objetos forma un *agujero negro* que, debido a su gran densidad, absorbe todo incluso a la luz y nada puede escapar.

Actualmente se sabe que en el universo existen muchos agujeros negros, los que no se ven pero su existencia se conoce por sus efectos gravitacionales. En el centro de las galaxias se considera que existen las condiciones adecuadas para la presencia de agujeros negros masivos.

El colapso surge de las soluciones a las ecuaciones de Einstein. Se han propuesto varios conceptos respecto del colapso. Este ocurre como resultado de la fuerte deformación del espacio-tiempo pero no se conoce cuál es la naturaleza de un agujero negro, no se sabe de qué está hecho. Algunas teorías consideran que los agujeros negros son parte de la llamada *materia oscura*, de la cual también se desconoce su naturaleza.

Se ha llegado a pensar que, los agujeros negros podrían conectarse a través de “puentes” que podrían llevar a “otro lugar” en el mismo universo e, incluso, a “otro” universo.

El universo está en expansión

Si los cuerpos como el Sol, o las estrellas colapsantes al formar un “colapsar” o agujero negro, deforman al espacio-tiempo se puede pensar que el universo mismo es el resultado de un espacio y tiempo curvos.

Hubo dos importantes acontecimientos a principios del siglo XX. Uno, fue en la Rusia soviética, en 1919. Alexander Friedmann, notable matemático, al resolver las ecuaciones de Einstein encontró que describían un universo en movimiento. Inicialmente, esa idea fue rechazada por el propio Einstein quien creía en un universo estático, sin movimiento. Pero las soluciones a sus ecuaciones indicaban lo contrario. Entre las diversas soluciones están, también, las realizadas por Willem de Sitter (1917) y de George Lemaître (1927) ésta última referida a un universo en expansión.

2005 energía 5 (67) 35, FTE de México

En 1929, Edwin Hubble, astrónomo norteamericano había observado en el Observatorio de Monte Wilson que las galaxias parecían alejarse de nosotros. Hubble estableció, incluso, una ley que lleva su nombre. Esa fue la evidencia observacional sobre el descubrimiento más importante de los últimos 100 años: la expansión del Universo predicha por la Teoría General de la Relatividad de Einstein.

Cuando en 1930 Einstein fue invitado por Hubble a Monte Wilson, el maestro observó emocionado ese movimiento de las galaxias que sugería la expansión del Universo resultante de sus ecuaciones, movimiento que él mismo había negado. “Ha sido el más grande error de mi vida”, dijo con sencillez el maestro, en una conversación con George Gamow, al reconocer que su Universo, nuestro Universo, está en movimiento y en expansión.

Geodésicas de espacio-tiempo

En la TER un observador hace mediciones en 4 dimensiones asignando coordenadas, se dice que el espacio-tiempo es una *variedad* cuadri-dimensional de eventos, el espacio-tiempo es *plano*; en TGR siguen existiendo las 4 dimensiones del espacio-tiempo pero ya NO existen coordenadas preferidas, el espacio-tiempo es *curvo*. En TER existen observadores privilegiados, los observadores situados en sistemas de referencia inerciales, en TGR no existen sistemas inerciales. En ambos casos, sin embargo, se postula que las leyes de la física son las mismas en sistemas inerciales y no inerciales. Esto se llama el Principio de Equivalencia, y tiene su origen en la equivalencia de inercia y masa gravitacional.

En TGR el movimiento de una partícula se parametriza mediante una curva llamada *geodésica*, es decir, una partícula de prueba se mueve a lo largo de una geodésica de espacio-tiempo. En TER, las geodésicas son líneas rectas de cuatro dimensiones. Localmente, una geodésica aparece como línea recta pero, a gran escala, domina la curvatura del espacio-tiempo. Este efecto de la geometría sobre la materia se conoce como gravitación. Por su parte, la materia deforma a la geometría.

Es por ello que, a la TGR, se le conoce como una teoría geometrodinámica ya que, en breve descripción, el espacio actúa sobre la materia diciéndole como moverse y, en turno, la materia reacciona sobre el espacio diciéndole como

2005 energía 5 (67) 36, FTE de México

curvarse. Las ecuaciones de la teoría de gravitación de Einstein describen los efectos de la gravedad en términos de un espacio-tiempo curvo y establecen una relación proporcional entre la curvatura del espacio-tiempo y la distribución de materia.

Las ecuaciones de la TGR son llamadas ecuaciones *de campo*, también conocidas como ecuaciones de Einstein y están expresadas en cálculo de *tensores* o en cálculo de *variedades*, nuevas matemáticas que surgieron con el desarrollo de la física-matemática y las contribuciones previas de Nicolai I. Lobachevsky, Karl F. Gauss, Marcel Grossmann y George F.B. Riemann, entre otros matemáticos.

Las ecuaciones del campo gravitacional son más complicadas que las del campo electromagnético. Al resolverlas se obtienen diversas soluciones. Las ecuaciones de Einstein rigen el movimiento de los planetas en el sistema solar, la desviación de la luz por el Sol, el colapso de una estrella para formar un agujero negro, determinan la geometría del espacio-tiempo de los agujeros negros, la expansión del universo y más, mucho más.

El Universo obrero

Para los trabajadores de la energía, los conceptos de la Teoría General de la Relatividad y sus consecuencias, son del más alto interés en la medida en que somos partícipes de un proceso de trabajo, el energético, que implica a la fuerza electromagnética, a los electrones y la luz, pero también a las fuerzas nuclear fuerte y débil, y a la fuerza gravitacional.

Siendo parte de la clase obrera del mundo, los conceptos de espacio-tiempo, materia y energía, y sus implicaciones son motivo de reflexión en el *espacio del saber obrero* y en el contexto del *Universo Obrero* cuyo pensamiento clásico tiene especiales connotaciones filosóficas proletarias.

El movimiento es un concepto asociado a la materia, el movimiento es una de las propiedades de la materia pues No existe movimiento sin materia, escribió Lenin. La expansión del universo es el reconocimiento de estos conceptos. Más aún, ese

movimiento existe independientemente de nosotros, fuera de nuestra conciencia. Ese movimiento, la existencia y expansión del universo, ha ocurrido mucho antes de la existencia humana y, más aún, de la existencia de la conciencia. Tal movimiento seguirá existiendo después de la vida, por lo menos, la conocida en el Sistema Solar. ¿Eso quiere decir que, alguna vez, desaparecerá la vida? Sí, desde los mayas mexicanos se sabe que el Sol es finito y la Tierra, con sus habitantes, también. Pero, esa “alta floración”, como le llamó Engels a la vida, resurgirá otra vez en otro tiempo y otro lugar.

¿Cómo es, entonces, el universo? ¿Es finito o infinito? ¿Es abierto o es cerrado? Einstein postula un universo en expansión con características de *finitud* pero es un universo que se expande cada vez más y es *plano* considerado a gran escala. Por el momento, hay quienes se inclinan por una descripción de universo conocida como *Quintaesencia*. ¿Hay, sin embargo, otros Universos? Si podría haberlos. Se ha postulado un Universo hecho de *cuerdas* (y *supercuerdas*) *cósmicas* y otro de *texturas cósmicas*. También podría haber Universos paralelos.

Se piensa, incluso, que el Universo, nuestro Universo, es solamente uno entre muchos, tal vez el más probable pero podrían existir Universos de burbujas, Universos múltiples, y Universos pulsantes, es decir, Universos que no tienen principio ni fin, que se contraen y expanden sucesivamente, pulsando como un corazón y extendiéndose como un fractal.

Referencias

- Bahen D. 2003, *General Theory of Relativity*, UK.
- Bahen D. 2003, *Geometrodynamics*, UK.
- Albert Einstein archives, The Jewish National & University Library, The Hebrew University of Jerusalem. www.albert-einstein.org
- Engels F. 1978, *Dialéctica de la Naturaleza*, Grijalvo.
- Hey T., Walters P. 1997, *Einsteins ´s Mirror*, Cambridge.
- Kinney A., White N., Wanjek C. 2005, *Beyond Einstein*, en *Astronomy* 33 (10), 52.
- Lenin V.I. 1980, *Materialismo y Empiriocriticismo*, Obras Completas, T.14, Ed. Allende.
- Misner Ch. W., Thorne K.S., Wheeler J.A. 1973, *Gravitation*, Freeman.



Cúmulo de galaxias Abell 1689 ubicado a 2 mil 200 millones años-luz lejos de nosotros. Cuando la luz que ahora vemos salió de esa región, el planeta Tierra tenía apenas la mitad de su actual edad. El hombre todavía no existía sobre la Tierra. La gravedad de este cúmulo deforma al espacio, el cúmulo actúa como una lente (gravitacional) distorsionando a las galaxias más distantes en objetos como arcos.



Albert Einstein observando en Monte Wilson con el telescopio de 100 pulgadas. Mientras, Edwin Hubble fuma su pipa. El Universo está en expansión.