

2005, 100 años de la Teoría de la Relatividad Especial

Teoría de la Relatividad Especial

- # Nueva versión del espacio y el tiempo; no son conceptos absolutos sino relativos; y están unificados en el espacio-tiempo de cuatro dimensiones.
- # Los postulados de la teoría de la relatividad especial son dos,
- # 1- El principio de relatividad y 2- La constancia de la velocidad de la luz.
- # Las interacciones, de la materia y la energía, conocidas en el universo no son instantáneas, ocurren a una velocidad finita.

Los días de mayo en 1905

Los diez años previos fueron de intenso pensamiento, Einstein creía que la velocidad de la luz debía ser universal e independiente del movimiento de la fuente que la emite. Si esto era así, habría que despreocuparse por el hipotético *éter* pues no era necesario para explicar a la física moderna. El famoso experimento de A. Michelson y E.W. Morley, con resultados nulos acerca del *éter*, había ya demostrado que la velocidad de la luz es la misma en todas direcciones.

El artículo de Einstein fue escrito de manera directa, sin referencias, con un estilo sencillo y sin necesidad de ninguna matemática avanzada. El artículo tiene, además, una extraordinaria lógica y claridad.

Einstein platicó una vez que su amigo Michele Angelo Besso lo había ayudado. En “un momento de Mayo” (de 1905), Einstein visitó a Besso en Berna y conversaron acerca del problema que aquejaba al maestro pues no podía reconciliar la idea de la constancia de la velocidad de la luz con la suma de velocidades de Galileo. Besso lo escuchó

atentamente y conversaron como acostumbraban los amigos. Luego, Einstein dijo que había entendido la clave del problema. Al siguiente día, regresó a la casa de Besso para comunicarle que tenía resuelto el problema y la solución estaba en la naturaleza del *tiempo*.

Einstein llegó a la conclusión de que no hay tiempo absoluto, es decir, un tiempo que sea el mismo en todas partes, para todos, para cualquier velocidad. Durante 5 semanas, Einstein se dedicó a escribir el famoso artículo que luego envió a la revista *Annalen der Physik* para su publicación.

Su hermana Maja recordaría después que Einstein esperaba ansioso alguna reacción a su trabajo intitulado “La electrodinámica de los cuerpos en movimiento”. Pero, ¡nada!, no hubo reconocimiento ni crítica, la única respuesta fue el silencio. En los siguientes números la revista ni lo mencionó. Un día, Einstein recibió una carta pidiéndole aclarar algunos puntos que parecían oscuros. Einstein se puso feliz, había recibido solo una carta pero era la de Max Planck, físico alemán fundador de la teoría cuántica.

2005 energía 5 (63) 36, FTE de México

Con su artículo Einstein planteó una nueva visión del espacio y del tiempo. Antes de esta versión el principio de relatividad tuvo importantes antecedentes.

El principio de relatividad de Galileo y Newton

En el siglo XVII era impensable que la Tierra se moviera alrededor del Sol. Si así fuera ninguna flecha o piedra podrían seguir trayectorias rectas al ser lanzadas desde un arco o una torre. En ambos casos, la flecha o la piedra caerían delante o atrás del arquero o tirador. El vuelo de los pájaros, el movimiento del aire y los océanos no se explicaba con un planeta en movimiento.

El conflicto entre la ciencia y la religión era muy acentuado. Desde los días de Nicolás Copérnico, se enfrentaron dos visiones, una sostenida por él mismo basada en un esquema del Sistema Solar según el cual los planetas giran alrededor del Sol y, la otra, defendida a ultranza por la jerarquía católica afirmaba que el centro del universo era la Tierra. Este esquema fue reflejado por Dante Alighieri en *La Divina Comedia*. La Tierra está en el centro, a su alrededor giran Mercurio, Venus, el Sol, Marte, Júpiter y Saturno. Después, a la manera de Ptolomeo hay varias esferas cristalinas. En la VIII esfera cristalina están las estrellas fijas y el zodiaco. Más adelante, estaría el paraíso. En la Tierra, habría dos polos, abajo el infierno y arriba el purgatorio, que sería el paraíso terrestre. La Tierra estaba separada de la Luna por la primera esfera y entre ambas estaba el aire.

El conflicto lo pretendió resolver la Inquisición con sus métodos criminales. Giordano Bruno, profesor italiano, fue quemado vivo en la hoguera por divulgar las ideas de la revolución Copernicana. Mientras, en Praga, Johannes Kepler estudiando los registros astronómicos de Tycho Brahe, encontró que el movimiento de los planetas es elíptico más que circular haciendo más preciso el esquema de Copérnico.

En la Italia medieval, Galileo Galilei realizó un conjunto de experimentos y observaciones que lo llevaron a fundar las bases de la física. Desde luego, fue perseguido por el clero obligándolo a abdicar públicamente de las opiniones de Copérnico.

No obstante, Galilei había imaginado un barco en movimiento. Dentro de la cabina, Galileo estimaba que observando solamente los movimientos de los pájaros y peces, sería imposible

decir cuando estaba el barco en reposo o movimiento con una velocidad constante.

Luego, Newton hizo una formulación matemática de las ideas de Galileo y formuló una ley para el movimiento constante. Introduciendo el concepto de “fuerza”, estableció que todos los cuerpos permanecen en estado de reposo o movimiento uniforme a menos que una fuerza externa actúe sobre ellos. Los sistemas de referencia, en reposo o en movimiento constante respecto de otros, se llaman sistemas de referencia inerciales. Dos siglos después, Einstein desarrollaría las ideas del movimiento relativo.

El principio (mecánico) de la relatividad establece que las leyes de la mecánica toman la misma forma en cualquiera de los sistemas de referencia inerciales. El principio de la relatividad que *todas* las leyes de la física toman la misma forma en cualquier sistema inercial de referencia. Además, de la mecánica, incluye especialmente a la electricidad, el magnetismo y la óptica.

La velocidad de la luz es constante

Las bases fundamentales de la Teoría Especial de la Relatividad (TER) son dos, 1- el principio de relatividad y 2- el principio de la constancia de la velocidad de la luz.

El principio de la relatividad se originó en la mecánica de Galileo y Newton. El otro principio es una consecuencia de la electrodinámica de J.C. Maxwell y la interpretación de H.A Lorentz en el siglo XIX. Se pensaba que la materia ordinaria está hecha de partículas eléctricamente cargadas, los electrones, que se mueven a través del hipotético e inamovible éter. El movimiento de los electrones produce los campos electromagnéticos incluyendo las ondas electromagnéticas que percibimos como luz.

Una consecuencia de la concepción del éter estacionario de Lorentz es que la velocidad de la luz (aproximadamente 300 mil kilómetros por segundo) con respecto a ese éter es constante e independiente del movimiento de la fuente de luz.

Sin embargo, desde esa misma época, quedó demostrado que el éter no existe. Einstein adoptó una versión modificada de la conclusión de Lorentz indicando que hay un *sistema inercial* en el cual la velocidad de la luz es una constante independientemente de la velocidad de la fuente. La omisión de la palabra éter fue deliberada y crucial porque la velocidad de la luz es una constante

universal y el principio es válido en todos los sistemas inerciales.

Einstein demostró que la teoría del éter era innecesaria, que el espacio se contrae asimismo y el tiempo se *alenta* conforme un observador se mueve a velocidades cercanas a la luz.

La compatibilidad lógica de los principios de la TER es dada por el análisis de los conceptos de tiempo, simultaneidad y longitud.

El tiempo es relativo

El concepto de tiempo absoluto significa que existe solamente un tiempo, el mismo para todos, en cualquier parte, independientemente de sus velocidades relativas. Pero, el tiempo tiene otro concepto de acuerdo a la teoría de Einstein. La teoría de la relatividad especial está basada en 2 postulados: 1- la velocidad de la luz es constante y 2- las leyes de la física son las mismas para todos los observadores moviéndose a velocidades constantes uno respecto del otro. Esto resume a la teoría, lo demás son las consecuencias de estas suposiciones.

La nueva idea sobre el tiempo está basada en el concepto de la simultaneidad. ¿Qué quiere decir que dos eventos ocurren al mismo tiempo?

Einstein imaginó experimentos mentales utilizando trenes, la emisión de señales de luz y observadores en reposo y en movimiento. Al principio el tren está en reposo y hay 2 observadores (receptores), uno en cada extremo del tren. Desde el punto medio, un observador (emisor) emite una señal de luz, misma que es recibida (casi) al mismo tiempo por los observadores de los extremos, es decir, la señal arriba simultáneamente a cada extremo. Luego, el tren se pone en movimiento con velocidad constante. En el momento en que el tren pasa por el punto medio el emisor envía su señal. Pero, para este observador un extremo del tren se acerca y, el otro, se aleja. Entonces, el tiempo de arribo de las señales es diferente ya que la luz tiene que viajar distancias distintas. Sin embargo, para otro observador, que viaja en el tren, la señal es recibida al mismo tiempo en ambos extremos.

Los dos casos anteriores son correctos. Es decir, un evento que es simultáneo para un observador no es necesariamente simultáneo para otro observador. Se dice que la simultaneidad es relativa. Esta es una consecuencia de la relatividad y depende del hecho que la velocidad de la luz es la

2005 energía 5 (63) 37, FTE de México misma para todos los observadores en movimiento y ésta velocidad es finita.

Desde el punto de vista de la cinemática de Newton, la simultaneidad es la *misma* en un sistema inercial moviéndose con respecto a un sistema inercial de referencia. De acuerdo a Einstein, la simultaneidad es *diferente* con respecto a diferentes sistemas inerciales. Teniendo en cuenta el principio de la constancia de la velocidad de la luz, dos eventos que ocurren simultáneamente están separados por un rayo de luz.

Esto es, de acuerdo a Newton, las interacciones en el universo son instantáneas, ocurren a velocidad *infinita*; de acuerdo a Einstein, ocurren a velocidad *finita* y el límite está determinado por la velocidad de la luz. He allí, la connotación revolucionaria de las consecuencias de la teoría de la relatividad especial.

Examinada con esta nueva cinemática, la teoría electrodinámica de Maxwell-Lorentz tiene la misma forma en todos los sistemas inerciales y es *covariante*. Más aún, los campos eléctricos y magnéticos son solamente aspectos de un campo fundamental, el campo electromagnético.

Los relojes en movimiento se mueven lentos

Los relojes en movimiento son más lentos que los relojes en reposo. Por ejemplo, un reloj de luz está formado por dos espejos. Cuando el reloj hace *tic*, un pulso de luz viaja de un espejo a otro y, cuando hace *tac*, el pulso regresa. Si los dos espejos están en reposo, ese *tic-tac* ocurre en línea recta, la luz se refleja. Pero, si el reloj se pone en movimiento, cuando hace *tic* está en un cierto punto y cuando hace *tac* está en otro; por tanto, la luz viaja una distancia mayor. Como la velocidad de la luz es la misma para ambos observadores, el tiempo para un observador en movimiento es más largo. Esta cantidad, llamada *dilatación* del tiempo, depende de la velocidad del observador. De manera que, el tiempo transcurre más lentamente en un reloj en movimiento. Por otra parte, para un objeto en movimiento, la longitud se contrae.

El sistema Newtoniano está basado en el sentido común, de manera que, un segundo en la Tierra es el mismo que un segundo en la Luna, o en Marte, o cualquier parte del Sistema Solar. Dos relojes se pueden sincronizar en cualquier parte del universo ya que el tiempo se comporta uniformemente. Lo mismo puede decirse con

2005 energía 5 (63) 38, FTE de México

respecto a la medición de la longitud. No es así en el sistema de Einstein, pues el espacio y el tiempo son relativos, más aún, no son conceptos separados sino unificados en el espacio-tiempo.

De acuerdo a Einstein, el tiempo transcurre con diferente rapidez dependiendo de la velocidad del observador. Si este se mueve más rápido, el tiempo transcurre más lento. Un reloj en la Tierra no es necesariamente el mismo en otra parte del universo.

La paradoja de los gemelos

Imaginemos dos trabajadores gemelos, uno en la Tierra (permaneciendo en reposo) y otro a bordo de una nave espacial (en estado de movimiento) viajando a velocidades próximas a la luz. El segundo gemelo hace un viaje a las estrellas, cuya distancia puede conocerse, y regresa a la Tierra. Cuando llega se encuentra con el gemelo que permaneció en Tierra. Al encontrarse, éste ha medido en su reloj el paso del tiempo y envejeció; el otro, en cambio, aparece más joven, su reloj midió otro tiempo.

Pero, cuando el gemelo estaba en viaje y miraba al gemelo que permaneció en Tierra, el viajero aparecía en reposo y el terrestre parecía alejarse. Para el viajero, el gemelo en Tierra es quien había viajado a gran velocidad y vuelto más joven mientras que el viajero había envejecido.

Sin embargo, los dos puntos de vista no son los mismos. El gemelo viajero se movió, respecto del gemelo en Tierra considerado “en reposo”. El viajero fue a las estrellas y regresó. Pero el viajero no se movió con velocidad constante, el terrestre sí. De manera que, el viajero es más joven.

El espacio-tiempo

La teoría de la relatividad especial de Einstein unificó las tres dimensiones del espacio y la dimensión temporal. Vivimos en un mundo de 4 dimensiones, en un espacio-tiempo cuadridimensional en términos de la descripción de H. Minkowski, matemático de Lituania y profesor de Einstein en Zurich.

El espacio está descrito por 3 direcciones: adelante y atrás, izquierda y derecha, arriba y abajo. El tiempo representa la cuarta dimensión. Un punto que considera las 4 dimensiones se llama *evento* y la trayectoria seguida por el movimiento se llama *línea del mundo* (o del universo).

Una vez, S. Hawking, profesor Lucasian de Cambridge y sucesor de Newton, escribió que para él era difícil visualizar las cuatro dimensiones a la vez. Es común representarse una idea tridimensional pero los matemáticos han desarrollado teorías en muchas dimensiones. Por ejemplo, en la teoría de las cuerdas cósmicas, una cuerda tiene que vibrar en 10 dimensiones espacio-tiempo.

Para visualizar las 4 dimensiones de la teoría de Einstein, nada mejor que hacer un “viaje a las estrellas”. Para un trabajador a bordo de una nave espacial, en reposo respecto a la nave, la línea del mundo es recta y paralela a su eje del tiempo. Sin embargo, de acuerdo a la formulación de Minkowski, la dirección del tiempo está inclinada con un cierto ángulo respecto a la dirección del tiempo para un observador en la Tierra. De acuerdo a Einstein, los observadores viajero y terrestre, mirarán que la luz se mueve a la misma velocidad pero, las direcciones del espacio y el tiempo son distintas para cada observador. Esto es así, porque el movimiento en 4 dimensiones, en el pasado y el futuro, solo puede realizarse dentro de un *cono de luz*. El presente está definido por la intersección de las 3 dimensiones espaciales y la dimensión temporal.

Así, los valores del tiempo y el espacio en cada evento, vistos por un observador en movimiento, pueden expresarse en términos de una mezcla sucesiva de los tiempos y espacios previos del evento, vistos por un observador estacionario.

La nueva historia del mundo

Para deducir sus conclusiones, Einstein realizó experimentos basados en imágenes mentales de relojes, trenes, haces de luz y bicicletas.

La teoría de Newton no explica sino contradice la teoría de la luz de Maxwell. La teoría de Einstein sí explica a la teoría electromagnética. Los campos eléctricos y magnéticos vistos por un observador son una mezcla de lo que ve otro observador en movimiento relativo. El movimiento de los electrones produce una corriente eléctrica y, debido a ese movimiento, se crean campos eléctricos y magnéticos. El magnetismo es un efecto debido al movimiento relativista de los electrones.

En la teoría de la relatividad de Einstein la velocidad de la luz es constante, las longitudes se contraen y las masas se incrementan conforme el movimiento de la materia se aproxima a la velocidad de la luz. Se dice que la longitud se

contrae y el tiempo se dilata. La contracción de la longitud quiere decir que el espacio se comprime, y la dilatación del tiempo quiere decir que el *tic tac* de los relojes se *alenta*, a diferentes velocidades a través de universo

Desde muy joven Einstein había estado fascinado por comprender la naturaleza de la luz y así fue toda su vida. Para desarrollar su trabajo, el maestro se basó en el desarrollo previo de muchos grandes, como J.C. Maxwell, A. Lorentz, E. Mach, E.H. Poincaré y otros. ¿Porqué Einstein y no otro? Porque Einstein no se limitó al concepto de tiempo local, lo tomó con más seriedad para elevarlo al nivel de la realidad física.

La TRE es un principio teórico para la construcción de la teoría de la luz. Con la teoría de

2005 energía 5 (63) 39, FTE de México la relatividad (especial y general) Einstein cambió el curso de la historia y transformó nuestro entendimiento del universo.

Referencias

- Bahen D. 2004, *Special Relativity Theory*, UK.
Einstein A. 1905, *Ann. Physik* 17, 140.
Einstein A. 1952, *The Principle of Relativity*, Dover.
Hey T., Walter P. 1997, *Einstein's Mirror*, Cambridge University Press.
Kaku M. 2004, Einstein [in a nutshell], en *Discover* September 2004, p17. www.discover.com
Panek R. 2005, Relativity turns 100, en *Astronomy* February 2005, p32. www.astronomy.com
Stachel J., 2005, *How did Einstein discover Relativity?* The Center for History of Physics, American Institute of Physics. www.aip.org



En la Teoría Especial de la relatividad de Albert Einstein el tiempo es relativo y los conceptos de espacio y tiempo no están separados sino unificados en el concepto espacio-tiempo de 4 dimensiones.