



La teoría (especial) de la relatividad de Einstein para niños

Capi Corrales Rodríguez¹

En diciembre de 2002, mi sobrino Pablo, que entonces tenía 12 años, me pidió como regalo de Navidad que le explicase la teoría de la relatividad de Einstein, y su hermano Guillermo, un año menor, se apuntó encantado al regalo. ¡Contar la teoría de relatividad a niños! No lo había hecho nunca, y tardé hasta la primavera en prepararme. En junio de 2003 nos reunimos para merendar (se apuntaron también su madre, Mónica, su hermano Mateo —5 años— y su primo Lucas —12 años—), les expliqué en qué consistía la teoría de la relatividad de Einstein, y al acabar les di a cada uno de ellos una copia llena de faltas de ortografía de esta carta (como compruebo ahora, cuatro años después, al revisarla con la inestimable ayuda de Andrés Cassinello). Para leerla, basta con ser como Pablo: tener al menos doce años, mucha curiosidad, mucha paciencia y un gran sentido del humor, porque es cuando encaramos tareas difíciles cuando el sentido del humor (tan distinto del ingenio, aunque frecuentemente se confunda con él) es imprescindible para seguir disfrutando pese a los frecuentes e inevitables resbalones.

¹ Publicado en *El Adelantado de Indiana*, Diciembre 2007, n° 7, www.eladelantadodeindiana.co.nr

Querido Pablo:

Me has pedido que te explique la teoría de la relatividad de Einstein², y voy a intentar hacerlo. La teoría de la relatividad es una teoría física —es decir, que describe propiedades del Universo que nos rodea; porque Einstein era físico, como sabes, y estudiaba el Universo que nos rodea buscando leyes y reglas con las que explicar lo que observaba—, contada en el lenguaje de las matemáticas, unas matemáticas muy difíciles que son imposibles de entender si no se dedican unos cuantos años a estudiarlas. Por eso he decidido saltarme los detalles y explicarte algunas de sus ideas principales, y por qué estas ideas han supuesto una de las revoluciones más grandes en la historia de la ciencia y del pensamiento. Para poder hacerlo tengo primero que contarte algo sobre cómo se pensaba que funcionaba el Universo en la época de Einstein, a principios del siglo XX.

El siglo XVII: La mecánica clásica de Newton y las transformaciones de Galileo

Las ideas fundamentales que tanto Einstein como los demás físicos de principios del siglo XX tenían sobre el mundo venían de la teorías de Newton. Newton fue un físico y matemático inglés que vivió en el siglo XVII, el siglo en el que, por hacerte una idea de cómo era Europa entonces, vivieron Velázquez, Cervantes, Shakespeare y Bach, en el que se inventó el lápiz, y en el que los colonos holandeses fundaron la ciudad de New York —en la que nació tu hermano Guillermo— con el nombre de New Amsterdam.

Los físicos y astrónomos anteriores a Newton habían mirado sólo la Tierra o el Sistema Solar. Eratóstenes, por ejemplo, que midió el radio de la Tierra utilizando el tiempo que tardaban las caravanas en recorrer ciertas distancias; o Tolomeo, que dedujo mirando el Sol que la tierra era redonda; o Kepler, Copérnico y Galileo, que estudiaron los movimientos de los cuerpos del Sistema Solar. Newton aspiraba a más, y buscaba una teoría con la que explicar el movimiento y comportamiento de todos los cuerpos del Universo. Como Newton estaba interesado en estudiar movimientos de cuerpos celestes, necesitaba hablar de tamaños, distancias y posiciones, y de cómo las posiciones varían en el tiempo. Por eso, lo primero que necesitó hacer Newton es hablar del Espacio y del Tiempo. De hecho, Newton fue el primer matemático que habló de esas dos cosas, espacio y tiempo, y lo hizo tan bien, y de una manera tan clara, que nadie, hasta que llegó Einstein, pensó en contarle de otra manera.

² Sólo nos referiremos en estas páginas a la teoría especial de la relatividad de Einstein, una teoría que atañe a sistemas de referencia que se mueven unos respecto a otros de manera uniforme, esto es, con velocidad y dirección constantes.

La idea que Newton tenía del espacio era la de un contenedor enorme, una caja grandísima y vacía en la que los cuerpos celestes flotan como bolas de Navidad. Además, Newton pensaba que este espacio-caja es *absoluto*, es decir, que no cambia en el tiempo y es igual por todas partes. Eso quiere decir que tanto el espacio que ocupan las cosas (su tamaño), como el espacio entre las cosas quietas (la distancia entre dos cosas) o la posición que ocupan (su lugar en el espacio), son fijos y no cambian se midan desde donde se midan. El tiempo para Newton era también absoluto: el tiempo está ahí y avanza a su ritmo independientemente de nosotros. El tiempo que transcurre entre dos sucesos es el mismo lo midamos desde donde lo midamos. Por ejemplo, el tiempo que transcurra entre dos eclipses de luna será el mismo lo midamos desde la Tierra o lo midamos desde Marte. Dicho con palabras más precisas, las dimensiones de un objeto se mantienen fijas esté quieto o esté moviéndose, y los relojes mantienen su ritmo constante, ya estén quietos ya estén en movimiento.

Para poder medir las posiciones de los cuerpos del Universo, Newton utilizaba lo que en matemáticas llamamos un *sistema de referencia*. Cualquier esquina de la habitación en la que te encuentres mientras lees estas páginas, en la que se junten dos paredes y el suelo, nos sirve como sistema de referencia desde el que describir la posición de cualquier punto del cuarto con toda precisión: no tenemos más que dar tres números, lo que llamamos *las coordenadas rectangulares del punto*, y que son los números que miden la distancia desde el punto a cada una de las tres superficies —las dos paredes y el suelo— que hemos elegido como referencia. Pero claro, Newton, y los demás científicos, no se colocan siempre en el mismo sitio para observar el mundo; unas veces están en un lugar y otras en otro. De hecho, no hay ningún sistema de referencia que esté completamente quieto; los planetas, las estrellas, las nebulosas,... todo en el Universo está en constante movimiento. Así que los físicos no sólo no están siempre en el mismo lugar, sino que, de hecho, siempre se están moviendo. Allá donde se encuentran levantan su sistema de referencia, y luego utilizan las matemáticas para hacer los cálculos que les permiten comparar las medidas tomadas en unos y otros sistemas de referencia. Concretamente, Newton utilizó *la transformación de Galileo*, una regla matemática llamada así en honor de Galileo (un físico y matemático que vivió en el mismo siglo que Newton, pero un poco antes y en Italia) y que nos dice cómo pasar las medidas tomadas desde un sistema de referencia a otro.

Imagínate, por ejemplo, que tú estás en un tren y yo estoy quieta en el andén, y que el tren se mueve de manera uniforme respecto al andén con velocidad constante v . Tú te asomas

a la ventana y dejas caer una piedra; no la lanzas, simplemente la dejas caer. Tú ves la piedra caer al suelo en línea recta vertical hacia el suelo, mientras que yo la veo caer siguiendo una trayectoria parabólica. La transformación de Galileo me permite convertir tu recta en mi parábola y viceversa.

Ahora imagínate que tú te pones a andar dentro del tren. Si quiero utilizar la transformación de Galileo para hacer el cambio de las medidas tomadas desde tu sistema de coordenadas sobre el tren al mío sobre el andén, necesito conocer tu velocidad respecto a mí. Supongamos que tu hermano Guillermo viaja en el tren contigo, vuestro vagón avanza sobre las vías con dirección constante y velocidad constante de 500 kilómetros por hora, y tú echas a andar dentro del tren, y recorres el vagón caminando con velocidad de 10 kilómetros por hora precisamente en la dirección del movimiento del vagón. ¿Cuál es la velocidad con la que te mueves? Si te cronometra Guillermo desde dentro del tren, la respuesta es 10 kilómetros por hora. Si te cronometro yo desde el andén, la respuesta es $500 + 10 = 510$ kilómetros por hora. Si ahora repites el paseo, pero esta vez te mueves a lo largo del vagón en la dirección contraria a la que se esté moviendo el tren, Guillermo te dirá otra vez que estás andando a 10 kilómetros por hora, mientras que mi cronómetro dirá que te estás moviendo a $500 - 10 = 490$ kilómetros por hora. En ambos casos, para calcular tu velocidad respecto a mí yo echo las cuentas de acuerdo con lo que se llama *teorema de la suma de velocidades de Galileo*, $v+w$ (en nuestro ejemplo v es 500 y w es +10 ó -10, según en qué dirección camines) que me ha permitido utilizar la velocidad del tren y la que obtuvo Guillermo midiendo tu avance desde dentro del vagón, para calcular tu velocidad medida desde del andén.

Imagínate ahora que queremos conocer el movimiento de la Luna respecto a Segovia, tanto cuando desde Segovia se ve la Luna como cuando no se ve. Medimos su velocidad, su trayectoria, su posición, etc. desde un satélite artificial que se mueve a velocidad constante alrededor de la Tierra y, si conocemos la trayectoria y velocidad exactas del satélite respecto a Segovia, la transformación de Galileo con su teorema de la suma de las velocidades nos permite hallar el espacio y tiempo de cualquier posición de la Luna que haya observado el satélite desde Segovia. Ahora bien, ¿cómo sabemos que lo que se ve desde el satélite está de acuerdo con lo que se ve desde Segovia? Por una Ley Universal de los sistemas de referencia descubierta por Galileo y que se llama *Principio de Relatividad*. En física y matemáticas una *ley universal* es una regla que se ha podido demostrar que se cumple siempre en el Universo. Veamos qué es el *Principio de Relatividad*.

Te voy a hacer una pregunta que te puede parecer tonta, pero te la voy a hacer de todas maneras. ¿Porqué un azafato en un avión no sirve la comida mientras hay turbulencias, y espera a que deje de agitarse el avión antes de colocar las bandejas? La razón es obvia: si intentase servirnos mientras el avión se está moviendo nos echaría todo encima y nos pondría perdidos. La pregunta te puede parecer una bobada, pero tiene una segunda parte que no lo es: ¿Por qué el azafato sí puede servir la comida cuando se acaban las turbulencias y el avión lleva un vuelo uniforme? Si lo piensas con cuidado, es un hecho bastante sorprendente. Al fin y al cabo un avión de pasajeros suele moverse a unos mil kilómetros por hora respecto al suelo, y eso es una velocidad enorme. En principio una bandeja debería al menos vibrar. Pero no es así. Si el vuelo de un avión es uniforme, los pasajeros ni siquiera notamos que se está moviendo. Y lo mismo ocurre cuando viajamos en un buen tren o en un buen coche: mientras no haya cambios de velocidad ni de dirección y el vehículo se mantenga en movimiento uniforme, los pasajeros ni nos enteramos de que nos estamos moviendo (como no sea que miremos por la ventanilla y veamos los árboles pasar), y podemos hacer dentro de nuestro vehículo las mismas cosas que si estuviésemos en casa quietos. Por ejemplo, observar el cielo y estudiar el movimiento de los astros.

Este hecho es lo que se conoce en física y matemáticas como *Principio de Relatividad*, un principio que demostró Galileo y que nos dice que todas las leyes de la mecánica son las mismas para todos los sistemas de referencia que se muevan de manera uniforme. Este principio nos garantiza que da igual desde qué sistema de referencia midamos los movimientos de un cuerpo: siempre encontraremos las mismas leyes. Solo ha de cumplirse una condición: que elijamos sistemas de referencia que se muevan de manera uniforme los unos respecto a los otros.

Saber que las leyes de la mecánica son las mismas para todos los sistemas de referencia que se muevan de manera uniforme nos permite tomar medidas desde cualquier sistema. Ya tenemos un espacio donde están los cuerpos, un tiempo para medir cómo se mueven los cuerpos en este espacio, una ley universal que nos garantiza que da igual dónde nos coloquemos al realizar nuestras observaciones de los cielos siempre que estemos en un sistema que se mueva de manera uniforme y una transformación matemática para traducir las medidas tomadas desde un sistema de referencia en las tomadas desde otro. Así que podemos empezar a observar el mundo que nos rodea y a tomar nota de lo que vemos. Y eso es lo que siguieron haciendo los científicos de los siglos XVII, XVIII y XIX, siguiendo el ejemplo de

Galileo y Newton. A finales del siglo XIX (en 1881), dos científicos estadounidenses llevaron a cabo un descubrimiento sorprendente: la velocidad de la luz es constante en todas partes. Este descubrimiento se conoce con el nombre de *Ley de Propagación de la Luz*.

La *Ley de Propagación de la Luz* es una ley universal que nos dice que la luz se propaga —se mueve— siempre en línea recta, y con una velocidad constante de 300.000 Km. por segundo. Esta velocidad es la misma para la luz de todos los colores y de todos los objetos (lámparas, linternas o velas). Dicho con otras palabras: la velocidad de la luz nunca cambia. Como siempre se trata del mismo número constante 300.000 Km./seg., en vez de escribir un número tan largo, los científicos le dan el nombre de “c”. Siempre que vemos la letra “c” en un libro de ciencia sabemos que se está hablando de la velocidad de la luz, de 300.000 km./seg.

El siglo XIX: El electromagnetismo de Maxwell y las transformaciones de Lorentz

Otro de los grandes retos de la ciencia a lo largo de su historia, además de describir el movimiento de los cuerpos celestes, ha sido el describir el comportamiento de los fenómenos de magnetismo y electricidad, que no siguen las leyes de la mecánica de Newton, y requieren sus propias matemáticas. Por ejemplo, el teorema de las sumas de las velocidades de Galileo no sirve para describir fenómenos de electromagnetismo (como tampoco sirve para describir los fenómenos de la mecánica cuando las velocidades son altas).

A finales del siglo XIX, el físico Maxwell logró, por fin, encontrar las ecuaciones matemáticas que describían el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos, y fue el matemático Lorentz (1853-1928) el que encontró la regla matemática, conocida como la *transformación de Lorentz*, que permite pasar las ecuaciones de Maxwell que describen estos comportamientos de un sistema de referencia a otro.

Como comentamos en el ejemplo en el que tú caminabas dentro de un tren y yo me quedaba quieta en el andén, para poder utilizar la transformación de Galileo para pasar las medidas obtenidas desde un sistema de referencia a otro, necesitamos conocer la velocidad con que un sistema (tú) se mueve respecto al otro (yo), y esta velocidad la calculábamos utilizando la ley de la suma de las velocidades $v+w$. Al utilizar la transformación de Lorentz para pasar las medidas obtenidas al observar fenómenos electromagnéticos desde un sistema

de referencia a otro, la ley de la suma de las velocidades que utilizaremos será otra, que viene dada por la regla matemática $\frac{v+w}{1+\frac{vw}{c^2}}$. Cuando se trata de situaciones con velocidades

pequeñas (como trenes moviéndose, por ejemplo) las leyes de suma de velocidades de Galileo y Lorentz producen valores muy parecidos, porque al ser c , la velocidad de la luz, un número muchísimo más grande que las velocidades v o w el denominador en la fracción $\frac{v+w}{1+\frac{vw}{c^2}}$ es

prácticamente 1. Esto no ocurre cuando se consideran velocidades grandes.

Bueno, pues ya sabemos todo lo que tenemos que saber sobre lo que sabían los físicos y matemáticos de la época de Einstein para entender las ideas básicas de sus teorías.

Parte 3. Einstein se atreve a pensar de otra manera

Como el resto de los físicos de su época, Einstein (1879-1955) estudió las explicaciones que los científicos habían dado desde la época de Newton hasta los inicios del siglo XX, del comportamiento de los objetos del Universo, e intentó generalizar el *Principio de Relatividad* de Galileo a todas las leyes de la naturaleza. Pero se encontró con un problema. Para entenderlo, razonemos como Einstein: suponemos que el *Principio de la Relatividad* es cierto para todas las leyes de la naturaleza y que, por lo tanto, todas las leyes universales de la naturaleza se cumplen en todos los sistemas de referencia con movimiento uniforme. Como la *Ley de Propagación de la Luz* es una ley universal, tendrá que ser cierta en todos los sistemas de referencia con movimiento uniforme, así es que la velocidad de la luz medida desde cualquier sistema de referencia que se mueva de manera uniforme tendrá que ser siempre c , 300.000.km./seg.

Siguiendo el razonamiento del *experimento teórico* de Einstein, yo vuelvo a colocarme quieta en el andén y tú en un vagón que se mueve a velocidad constante v respecto al andén. Según el *Principio de Relatividad*, si tú desde el vagón y yo desde el andén medimos la velocidad de la punta de un rayo de luz, ambos deberíamos obtener como resultado que la velocidad del rayo es $c = 300.000$ km./seg. Empecemos, pues, a medir. Supongamos que yo me coloco sobre el andén con una linterna en la mano, la enfoco en la dirección del andén y la enciendo. La punta del rayo de luz que emite la linterna avanzará a lo largo del andén con

velocidad c con respecto al andén. De acuerdo con el teorema de la suma de velocidades de Galileo, si tú cronometras la velocidad de la luz desde el vagón y éste se mueve hacia la luz, la punta del rayo se moverá con velocidad $c + v$ con respecto a ti, mientras que si el vagón se aleja de la luz, la punta del rayo se moverá con velocidad $c - v$ con respecto a ti. En cualquiera de los dos casos, yo obtengo que la velocidad de la luz es c , y tú encuentras que es $c - v$ o $c + v$. ¿Cómo es que nos salen distintas si deberían salirnos igual? Nos encontramos ante un problema: aparentemente, la *Ley de Propagación de la Luz* es incompatible con el *Principio de Relatividad*.

La primera idea que se le ocurrió a Einstein fue la misma que se le ocurrió a muchos otros físicos de la época: nos hemos equivocado y el *Principio de Relatividad* sólo sirve para las leyes de la mecánica; sólo hay armonía en el mundo mecánico. No es tan disparatado que se considerase esta posibilidad; mientras se había creído posible representar todos los fenómenos de la naturaleza con ayuda de la mecánica, nadie había dudado de la validez del Principio de Relatividad. Pero según se fueron entendiendo más fenómenos como los de electromagnetismo y óptica, se fue haciendo evidente que la mecánica no era suficiente para dar una descripción física a todos los fenómenos de la naturaleza, y no parecía absurdo pensar que el Principio de Relatividad fallase allá donde no llegase la mecánica. Esto resultaba muy doloroso para Einstein, que creía en la armonía interna del Universo, de todo el Universo.

Einstein siguió pensando y dando vueltas al problema hasta que cayó en la cuenta de que la razón por la que en nuestro experimento teórico, por ejemplo, a ti te sale una velocidad de la luz y a mí otra, no es porque la velocidad de la luz cambie cuando cambia el sistema de referencia desde el que medimos (esto es, porque la *Ley de Propagación de la Luz* y el *Principio de Relatividad* sean incompatibles) sino porque tú y yo hemos tomado un punto de partida equivocado y eso nos ha hecho utilizar las matemáticas equivocadas: debiésemos haber utilizado las matemáticas del siglo XIX de Lorentz en vez de las del siglo XVII de Galileo. Sigamos el razonamiento de Einstein con detalle ([Einstein 1916], p.17 y sucesivas).

Einstein decidió tomar como punto de partida que tanto la *ley de Propagación de la Luz* como el *Principio de Relatividad* son ciertos, y que, por lo tanto, la única explicación posible a la aparente incompatibilidad entre estos principios que nuestro experimento teórico parece indicar, tiene que estar en la manera en que tú y yo hemos echado las cuentas, que necesariamente ha de ser errónea. Así que se puso a reflexionar sobre nuestra manera de echar las cuentas hasta que comprendió en qué nos habíamos equivocado.

Einstein encontró que la explicación estaba en que tú y yo, como todo el mundo antes de la llegada de la teoría de la relatividad, damos a los conceptos de distancia y tiempo un significado absoluto. Dicho con otras palabras: para nosotros, el tiempo en que algo ocurre y el tamaño de las cosas, son los que son, independientemente del sistema desde el que se midan. Y eso no es cierto. Fenómenos que son simultáneos cuando se observan desde un sistema de referencia, no lo son cuando se observan desde otro, y distancias que son iguales cuando se miden desde un sistema de referencia, no resultan necesariamente iguales al ser medidas desde otro sistema.

Lo que ocurrió en nuestro ejemplo del tren, es que ambos dimos por hecho que si tu caminas a 10 kilómetros *por hora* respecto al tren, estás recorriendo la misma distancia en cada hora también si medimos desde el andén, y eso no es cierto. Como veremos enseguida, no se puede dar por hecho que el tiempo que medido desde el tren tarda algo en ocurrir (que tú recorras 10 kilómetros, por ejemplo), sea el mismo tiempo que se obtiene si la medida se toma desde el andén. No es cierto que tú recorras sobre el vagón 10 kilómetros en un tiempo de una hora medido desde el andén. Medido desde el propio vagón sí, pero desde el andén, no. Reflexionemos con Einstein sobre ello.

3.1 Sobre el concepto de simultáneo:

Para describir los fenómenos de la naturaleza se necesitan tomar dos tipos de medidas: medidas de tiempos y medidas de distancias. La primera medida de tiempo es la del momento en el que ocurre un suceso, el que sea. Hasta Einstein, siempre se había dado por hecho que el momento en el que algo ocurre es fijo y no depende de el sistema de referencia desde dónde se mida el tiempo. Por lo tanto, tiene sentido decir que dos sucesos ocurren a la vez, que son simultáneos, se mida desde donde se mida. Sin embargo, Einstein se dio cuenta de que esto no es verdad, que no tiene sentido hablar de dos sucesos simultáneos sin más.

Volvamos a intentar reproducir el razonamiento de Einstein. Yo vuelvo a mi andén y tú a tu vagón que se mueve a lo largo del andén con velocidad constante v . Vamos a intentar contestar a la pregunta que se hizo Einstein: dos sucesos que sean simultáneos con respecto al andén (por ejemplo dos destellos de luz A y B), ¿son también simultáneos con respecto al vagón? La respuesta, como descubrió Einstein, es no. Veamos por qué. Supongamos

colocamos dos linternas en dos puntos A y B del andén, yo me siento justo en el punto medio M entre ellos, con un juego de espejos que me permite ver A y B a la vez sin tener que moverme y que tu tren viaja con velocidad v en la dirección AB.

Decir que dos destellos emitidos desde A y B, respectivamente, son simultáneos con respecto al andén quiere decir que los rayos de luz que se emiten en A y B se encuentran (se “chocan”, por así decirlo) precisamente donde yo estoy sentada, en el punto medio M. Pero los puntos A y B corresponden también a puntos A y B sobre el vagón. Vamos a llamar M' al punto medio de la distancia AB sobre el vagón, y tu te sientas en M' con tu propio juego de espejos. En el momento justo en que los destellos de luz ocurren, M' coincide con M, y por lo tanto tú y yo coincidimos, pero tú te vas moviendo con el tren hacia B con velocidad v , y por lo tanto, tanto el tren como tú os estáis aproximando hacia el rayo de luz que viene de B y os estáis alejando del que viene de A. Así es que tú verás el destello emitido por B antes que el emitido por A, y para ti y para todo observador que utilice el tren como sistema de referencia, el destello de luz B ocurrió antes que el A.

Este ejemplo nos ilustra que sucesos que son simultáneos con respecto al andén no lo son con respecto al tren, y en general, sucesos que son simultáneos respecto a un sistema de referencia no tienen por qué serlo respecto a otros. Aunque se muevan de manera uniforme. Al moverse tu tren, el tiempo corre más lento para ti. Tú no te das cuenta, pues vives en el tren y crees que el destello B fue emitido antes que el A. Pero desde el andén yo llego a otra conclusión: tus relojes miden el tiempo más lentamente que los míos. Y esto ocurre siempre, como demostró Einstein. Si el sistema de referencia se mueve, los relojes en él van más lentos, y cuanto más rápido se mueva el sistema, más lentos van los relojes en él. Por supuesto los habitantes del sistema que se mueve no se dan cuenta, pues todo en su vida ocurre según ese tiempo más lento y a ellos les parece el normal. Sólo se dan cuenta los que les observan y miden desde fuera. Dicho con otras palabras, **TODO SISTEMA DE REFERENCIA TIENE SU PROPIO TIEMPO PARTICULAR.**

3.2. Sobre el concepto de distancia:

Sigamos pensando como Einstein. ¿Cómo se miden las dimensiones de un cuerpo, esto es, las distancias entre sus partes? Queremos una manera de medir que sirva para todos los cuerpos de Universo, y algunos son enormes, como Marte. No podemos utilizar una regla. Lo

que se suele hacer para medir una distancia (y por lo tanto las dimensiones y tamaños de los cuerpos), es medir el tiempo que tardamos en recorrer la distancia a una velocidad constante y conocida. Por ejemplo, si caminamos a dos kilómetros por hora, y tardamos tres horas en recorrer la distancia, sabemos que la distancia que hemos recorrido es de seis kilómetros. Ahora bien, si para medir distancias medimos tiempo, y cada sistema de referencia tiene su propio tiempo TODO SISTEMA DE REFERENCIA TIENE SU PROPIA "MEDIDA DE LA DISTANCIA" PARTICULAR, concluyó Einstein. Cuando el sistema de referencia se mueve, siguió razonando Einstein, el tiempo va más lento, y en más tiempo se recorre más distancia. Así pues, en un sistema de referencia que se mueve no sólo decrece el ritmo del tiempo, también se hacen más grandes las distancias entre las cosas y sus tamaños, y cuanto más rápido se mueva el sistema, más aumentan las distancias y más grandes se hacen las cosas.

Necesitamos, pues, hacer nuestros cálculos con reglas matemáticas que tomen en cuenta estas características de las medidas de tiempos y distancias, y la matemáticas de Galileo no lo hacen, pero las de Lorentz sí. Si al hacer el cambio de las medidas tomadas desde un sistema de referencia a otro, en vez de utilizar la ley de suma de velocidades $v+w$ correspondiente a la transformación de Galileo de la mecánica clásica, descubrió Einstein, se utiliza la ley $\frac{v+w}{1+\frac{vw}{c^2}}$

correspondiente a la transformación de Lorentz utilizada en electromagnetismo, la aparente incompatibilidad entre la *ley de Propagación de la Luz* y el *Principio de Relatividad* desaparece.

3.3. Sobre el concepto de masa:

Las transformaciones de Lorentz son fórmulas matemáticas que relacionan distancias, tiempo, velocidad de la luz y lo que se llama la *masa* de un cuerpo, y, por lo tanto, nos ofrecen información sobre cómo se relacionan entre sí estos conceptos, Al estudiar la información que sobre los conceptos de tiempo, espacio o masa nos ofrecen las transformaciones de Lorentz, Einstein comprendió que muchas de nuestras ideas sobre estos conceptos no son más que convenciones basadas en prejuicios (juicios previos a la observación de los fenómenos) y hábitos culturales.

¿Qué es la masa, por ejemplo? Para cualquier persona de la calle, hablar de la masa de un cuerpo es lo mismo que hablar de su peso. Pero cuando los científicos hablan de la masa de un cuerpo, hablan de algo mucho más sutil que su peso: hablan de su resistencia a ser movido. Einstein estudió a fondo las fórmulas de Lorentz, que como hemos dicho relacionan distancias, tiempos y masas involucrados en un fenómeno con la velocidad de la luz. Y concluyó que si la velocidad de la luz es constante, entonces cuando un sistema de referencia se mueve más rápidamente, no sólo se hace más rápido el tiempo y más grande el tamaño de cuerpos, sino que también aumenta la masa de estos cuerpos.

Pensando sobre este sorprendente descubrimiento Einstein llegó a una conclusión que le hizo mucho más famoso que el trabajo por el que consiguió el premio Nobel. Su razonamiento fue algo de este estilo: el movimiento es una forma de energía, la energía cinética, la que transforma por ejemplo el movimiento del agua de los ríos en electricidad. Puesto que la masa de un cuerpo aumenta cuando aumenta la velocidad de su movimiento, y puesto que el movimiento es una forma de energía, el aumento en la masa de un cuerpo que se mueve ha de venir de un aumento de energía. Resumiendo: que la masa es energía. Tras llevar a cabo los necesarios cálculos matemáticos, Einstein encontró la fórmula que le permitía hacer el cambio de unidades de masa a unidades de energía (como hacemos el cambio de kilómetros a millas o de kilogramos a libras):

$$E=mc^2$$

Con el tiempo esta fórmula de Einstein, se ha convertido en la fórmula probablemente más famosa en la historia de la ciencia, sobre todo por el uso que se le dio para construir la bomba atómica. Nos dice que la energía contenida en cualquier partícula de materia es igual a la masa de ese cuerpo multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz. Traducido a números concretos: un kilo de carbón, si lo convertimos enteramente en energía, produciría 25 billones de kilovatios de horas de electricidad, o tanta energía como generarían todas las centrales eléctricas de Europa juntas si funcionasen sin parar durante dos meses.

Pero esta fórmula no sólo cuenta que la construcción de una bomba atómica es posible. También explica por qué el Sol y las estrellas han sido capaces de generar luz y calor durante siglos. Y otros muchos fenómenos de la naturaleza. Y sobre todo, nos hace pensar e una forma nueva. Antes de la teoría de la relatividad no sólo se creía en la existencia de un Tiempo y un Espacio absolutos, también se tenía la creencia de que el universo es una enorme

vasija que contiene dos tipos de elementos: la materia y la energía. Pero Einstein demostró que materia y energía son una misma cosa. La materia es energía y la energía es materia. La diferencia es simplemente una diferencia temporal de estado, como yo puedo estar hoy contenta y mañana triste.

Bibliografía:

Albert Einstein, 1916, *Relativity, the special and general theory*, Crown Publishers, New York 1961 (15a. edición)