

La incomprensible teoría de la relatividad
Autores: Msc. Alexis Gómez Zoque
Msc. Margie Alarcón Mora

RESUMEN

A pesar de que ya han transcurrido cien años desde que Albert Einstein creó la Teoría Especial de la Relatividad, la misma es muy poco conocida fuera del círculo estrecho de los especialistas. Sucede así, porque la citada teoría pertenece al grupo de las teorías de elevado grado de dificultad. A pesar de todo creemos que las nociones principales y las ideas de la teoría pueden ser expuestas de manera accesible para ser comprendidas por un círculo de lectores bastante amplio.

En el presente trabajo se exponen las ideas antes mencionadas utilizando solamente conocimientos físicos y matemáticos elementales que forman parte de la cultura general de cualquier persona que haya vencido el nivel medio de la Educación general.

ABSTRACT

Although they have already lapsed a hundred years since Albert Einstein formulated the Special Theory of Relativity, it is not very well-known outside of the narrow circle of the specialists. It happens, because the mentioned theory belongs to the group of the theories of high degree of difficulty. In spite of that we believe that the main notions and the ideas of the theory can be exposed in an accessible way to be understood by a quite wide circle of readers.

In present work the previous mentioned ideas are exposed using only elementary physical and mathematical knowledge that are part of the general culture of any person that has conquered the half level of the general Education.

Introducción

En el año 2005 se cumple el primer siglo de existencia de la **Teoría Especial de la relatividad** cuyos fundamentos fueron expuestos por su creador, Albert Einstein, en el artículo titulado “**On the Electrodynamics of Moving Bodies**” publicado en la revista alemana *Annalen der Physik* el 26 de septiembre de 1905.

Por el impacto que esta teoría ha tenido, tanto en la comunidad científica como en el público en general, varios autores de reconocido prestigio, entre los cuales se encuentra el propio Einstein, se han preocupado por exponer los elementos fundamentales de la misma de tal forma que sean comprensibles por el gran público. No obstante, debido a la aparente contradicción que, a primera vista, se presenta entre su contenido y el sentido común y la relativa complejidad de la matemática que se emplea en la exposición de los resultados obtenidos como producto de su más alto desarrollo, aun la mayoría de las personas considera que la comprensión de esta teoría es solo privilegio de genios, de personas superdotadas, concepción que ocasiona que ciudadanos con suficiente preparación para comprender sus bases, ni siquiera lo intenten.

Este trabajo constituye un esfuerzo más por lograr que el gran público comprenda los fundamentos de la ***Teoría Especial de la Relatividad***, que en esencia es una teoría sobre las propiedades del espacio y del tiempo.

DESARROLLO

Para comprender las bases de la teoría, tal y como se exponen en el presente artículo, se necesita recordar algunos conocimientos de la física y matemática elementales.

Iniciemos recordando las características del movimiento mecánico rectilíneo y uniforme (MRU). Se denomina **movimiento mecánico** al cambio de posición de un cuerpo, o de sus partes, con respecto a otros cuerpos o a otras partes del propio cuerpo, en el espacio en el transcurso del tiempo, así, por ejemplo un auto que marcha por una carretera se mueve respecto a los árboles, porque cambia de posición en relación con ellos pero no se mueve respecto al conductor (chofer) porque su posición, en el espacio, no varía con respecto a dicho conductor en el transcurso del tiempo, esto significa que cuando hagamos referencia al movimiento mecánico, o al reposo, debemos indicar, o dejar bien claro, en relación a cual o cuales cuerpos tiene lugar dicho movimiento o reposo.

Al cuerpo que se toma como principal para comparar a los demás y establecer cuáles se mueven y cuáles no respecto a él, se le denomina *cuerpo de referencia*. Si a dicho cuerpo se fija un sistema de coordenadas y se dispone de un instrumento para medir el tiempo (reloj) entonces se tiene un **sistema de referencia**.

Si en relación con un sistema de referencia dado se cumple la **ley de la inercia**, la cual puede enunciarse diciendo que; **todo cuerpo mantiene su estado de reposo o de MRU a no ser que sobre él actúen otros cuerpos que lo obliguen a cambiar dicho estado**, el sistema se denomina **inercial** de lo contrario se tiene un sistema no inercial. Todos los sistemas de referencia que se mueven con MRU, o que permanecen en reposo respecto a uno inercial son también inerciales.

Cuando la figura geométrica que describe un cuerpo en movimiento es un segmento de recta entonces el movimiento es rectilíneo, de lo contrario será curvilíneo.

Al dividir la distancia recorrida por un cuerpo que se mueve en forma rectilínea entre el intervalo de tiempo que demora en recorrerla se encuentra el valor de la velocidad. Si dicho valor permanece constante durante todo el intervalo estamos en presencia de un cuerpo que se mueve con MRU. Simbólicamente:

$$v = \frac{d}{\Delta t} \quad (1)$$

donde **v** significa el valor de la velocidad, **d** distancia recorrida y Δt intervalo de tiempo en el cual se recorrió la distancia d.

Si la distancia se expresa en metros (m) y el tiempo en segundos (s) entonces la velocidad se expresa en metros por segundo (m/s) .

Como se ve fácilmente de la fórmula (1), si conocemos la velocidad de un cuerpo que se mueve con MRU y el intervalo de tiempo durante el cual se ha estado moviendo, podemos calcular la distancia recorrida mediante la expresión:

$$d = v \cdot \Delta t \quad (2)$$

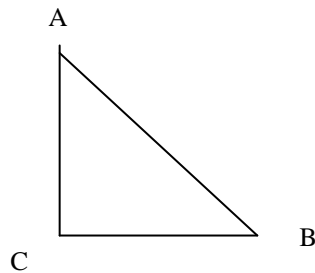
¿Qué distancia recorrerá un cuerpo en 10 s si se mueve con MRU a una velocidad de 20 m/s .

Finalmente, si sabemos los valores de la distancia y de la velocidad podemos calcular el tiempo empleado en recorrer dicha distancia por medio de la ecuación:

$$\Delta t = \frac{d}{v} \quad (3)$$

¿Qué tiempo demorará el cuerpo anterior en recorrer 1 000 m (1 km).

Además de las operaciones aritméticas básicas se necesita conocer el teorema de Pitágoras, que en síntesis consiste en lo siguiente:



Si se tiene un triángulo, uno de cuyos ángulos internos mide 90° , o sea es recto, se denomina *triángulo rectángulo*, los lados que forman parte del ángulo recto se llaman catetos, el lado restante se denomina hipotenusa, entonces un triángulo rectángulo tiene dos catetos y una hipotenusa (ver fig. 1).

Fig. 1 triángulo rectángulo (el ángulo c tiene una amplitud de 90°) los lados AC y CB son los catetos el lado AB es la hipotenusa.

El teorema de Pitágoras plantea que la longitud de la hipotenusa elevada al cuadrado es igual a la suma de los cuadrados de las longitudes de los catetos, o sea, en la figura 1 se cumple que:

$$AB^2 = AC^2 + CB^2 \quad (4)$$

Se invita al lector a que dibuje algunos triángulos rectángulos y verifique el cumplimiento del teorema de Pitágoras en cada uno de ellos realizando las mediciones y operaciones necesarias.

Se necesita también recordar que para indicar la posición de un punto en un plano es frecuente emplear un sistema de coordenadas rectangulares o cartesiano, similar al que se representa en la fig. 2.

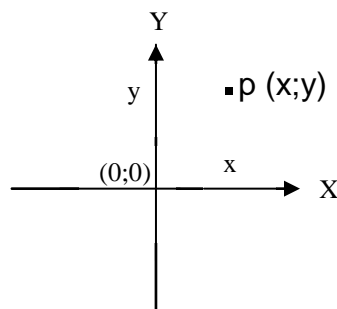


Fig. 2 Sistema de coordenadas rectangulares. Los ejes de coordenadas (el de las abscisas, o de las x , y el de las ordenadas o de las y) se cortan perpendicularmente en el origen del sistema (punto $(0;0)$). La posición de un punto cualquiera P , del plano, se indica por medio del par ordenado $(x;y)$.

Si se reflexiona acerca de la forma en que medimos el tiempo nos percataremos, que en esencia, lo que se hace es contar el número de veces que se repite un fenómeno periódico dado, cuando se dice que un evento duró tres días lo que se ha dicho es que el evento demoró lo suficiente como para que la tierra diera tres vueltas alrededor de su eje, o sea, el fenómeno periódico de rotación de la tierra se ha repetido tres veces, cuando una joven cumple quince años significa que desde el momento de su nacimiento hasta el día del cumpleaños la tierra ha realizado quince recorridos de su órbita alrededor del Sol. Todos los relojes se fundamentan en el conteo de las veces que se repite un fenómeno periódico dado, como las oscilaciones mecánicas de un péndulo, las oscilaciones eléctricas de un circuito, etc. En principio cualquier fenómeno cuyas características se repitan cada cierto intervalo puede ser empleado para medir el tiempo y por tanto ser tomado como base para construir relojes.

Una vez establecidos los conocimientos básicos se expondrán algunas ideas fundamentales que están en la base de la teoría especial de la relatividad.

La teoría parte de dos postulados o principios denominados **Postulados de Einstein** los cuales plantean:

1.- Todos los fenómenos físicos transcurren de igual modo en todos los sistemas inerciales de referencia; todas las leyes de la naturaleza y las ecuaciones que las describen son invariantes, es decir, no varían durante el paso de un sistema inercial de referencia a otro, o lo que es lo mismo, todos los sistemas inerciales de referencia son equivalentes (indiscernibles) por sus propiedades físicas. (Irodov 1981 p 200)

2.- La velocidad de la luz en el vacío no depende del movimiento de la fuente de luz y es igual en todas las direcciones. Esto significa que la velocidad de la luz en el vacío es idéntica en todos los sistemas inerciales de referencia. (Irodov 1981 p 200)

Basándose en los postulados anteriores se puede razonar del siguiente modo:

Se tienen dos sistemas de referencia inerciales de forma tal que uno se mueve respecto al otro con una velocidad \mathbf{V} y los ejes X y X' de ambos sistemas están orientados a lo largo de una misma recta. Fig. 3

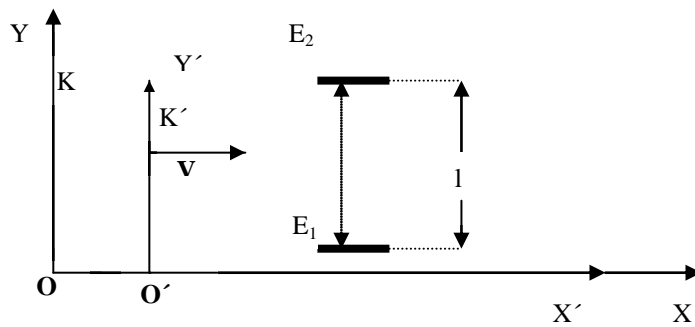


Fig. 3 El sistema K' se mueve con velocidad constante V con respecto al sistema K

E_1 y E_2 son dos espejos paralelos entre sí y fijos a K' (que se mueven en relación a con K a la velocidad V)

Si una señal luminosa se hace incidir perpendicularmente en E_1 se reflejará en este e incidirá de forma perpendicular en E_2 donde se reflejará nuevamente y volverá a incidir perpendicularmente en E_1 reflejándose en este y regresando a E_2 y así sucesivamente.

El fenómeno descrito (reflexión sucesiva de la señal luminosa en E_1 y E_2) es periódico y puede ser usado para medir el tiempo tomándose en este caso como “reloj”.

Un observador que viaja en K' encontrará que el tiempo que demora la luz en un viaje de ida y regreso, desde y hasta E_1 será igual a:

$$\Delta t_0 = \frac{2.l}{c} \quad (5)$$

donde l es la distancia que existe entre los dos espejos y c la velocidad de la luz (ver fórmula [3](#))

El mismo fenómeno visto por un observador fijo en K (en reposo respecto a K) tendrá el aspecto representado en la fig. 4.

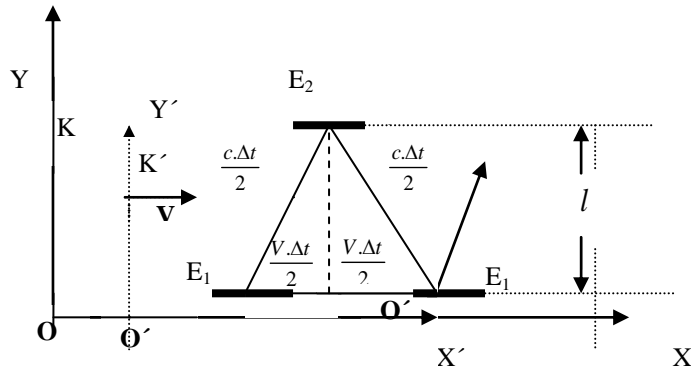


Fig. 4 Fenómeno de salida de la señal luminosa de E₁, reflexión en E₂ y retorno a E₁ visto por un observador fijo en K

Para este observador, el tiempo transcurrido desde que la luz sale de E₁ hasta que regresa será Δt , la distancia recorrida por la luz de un espejo al otro viene dada

por $\frac{c \cdot \Delta t}{2}$ y la distancia que se ha movido K' con respecto a K en ese tiempo será $V \cdot \Delta t$ (ver fórmula 2)

Teniendo en cuenta la figura 4 y aplicando el teorema de Pitágoras (fórmula 4) se tiene:

$$\left(\frac{V \cdot \Delta t}{2}\right)^2 + l^2 = \left(\frac{c \cdot \Delta t}{2}\right)^2$$

$$\frac{V^2 \cdot \Delta t^2}{4} + l^2 = \frac{c^2 \cdot \Delta t^2}{4}$$

$$l^2 = \frac{c^2 \cdot \Delta t^2}{4} - \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{4}$$

$$l^2 = \frac{\Delta t^2}{4} (c^2 - v^2)$$

$$\Delta t^2 = \frac{4l^2}{(c^2 - v^2)}$$

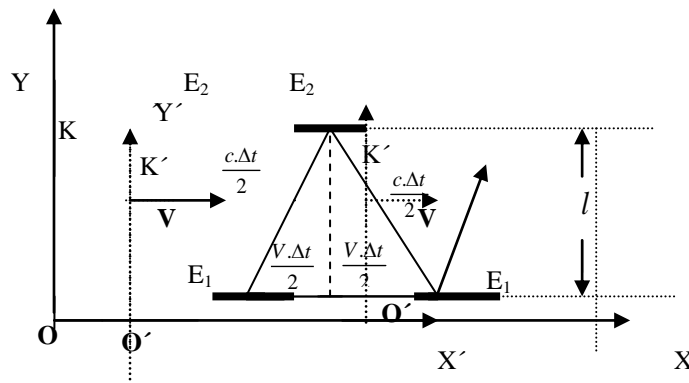


Fig. 4 Fenómeno de salida de la señal luminosa de E₁, reflexión en E₂ y retorno a E₁ visto por un observador fijo en K

$$\Delta t^2 = \frac{4.l^2}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \quad \text{Nótese que} \quad c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = (c^2 - v^2)$$

$$\Delta t = \frac{2.l}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{(1 - \beta^2)}} \quad (6)$$

donde $\frac{2.l}{c}$ según la fórmula [5](#) se ha sustituido por Δt_0 y $\beta = \frac{V}{c}$

La expresión 6 relaciona los intervalos de tiempo medidos por los observadores situados en diferentes sistemas de referencia inerciales, en movimiento uno respecto al otro. El fenómeno ocurrido es el mismo, oscilación de la señal luminosa entre los espejos E_1 y E_2 , sin embargo los intervalos tiempos transcurridos en ocurrir dicho fenómeno son diferentes en los distintos sistemas de referencia. El tiempo transcurrido según el sistema K, con relación al cual el **“reloj”** se mueve, es mayor que el transcurrido según el sistema K', con relación al cual el **“reloj”** se encuentra en reposo. $\Delta t > \Delta t_0$

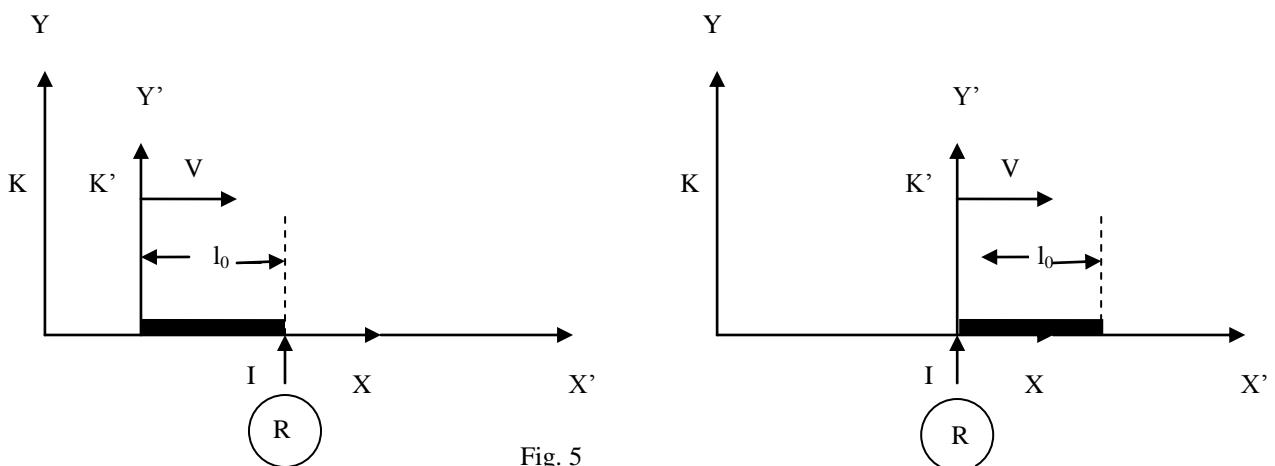
Puede ser sorprendente que la duración de un suceso sea diferente en diferentes sistemas de referencia y que dicha diferencia dependa de la velocidad relativa de los sistemas, sin embargo existen varios hechos experimentales que lo confirman.

Los objetos con que cotidianamente nos relacionamos se mueven a velocidades mucho menores que la velocidad de la luz en el vacío, la cual es aproximadamente de 300 000 km/s y por esa razón esta diferencia en el decursar del tiempo y otros muchos *efectos relativistas* pasan sin ser percibidos. Aplicando la fórmula 6 podemos calcular la diferencia entre los intervalos de tiempo transcurridos cuando se mide la duración de un suceso que ocurre en un avión que viaja a una velocidad de 850 km/h. Supóngase que el suceso es una “película” que dura una hora según el reloj de uno de los pasajeros ¿cuánto demorará según el reloj de la torre de control de un aeropuerto?.

Haciendo las operaciones correspondientes se encuentra que demora 1,000 000 000 000 619 horas (0,000 000 002 2 s). La diferencia es tan pequeña que no existe reloj alguno que la detecte y en la práctica común carece de importancia.

Haciendo un análisis parecido al que se hizo para el caso del intervalo de tiempo se llega a la conclusión de que los valores de muchas otras magnitudes dependen también del sistema de referencia respecto al cual se miden. A modo de ejemplos se hará referencia a los casos de la longitud y la masa.

En la figura 5 se representa una barra de longitud l_0 medida en el sistema K' con respecto al cual se encuentra en reposo. Dicho sistema se mueve con la velocidad V con relación al sistema K . (en la figura se representan los instantes en que los extremos de la barra pasan frente al indicador I).



Un observador que viaja junto con la barra y por tanto está en reposo respecto a ella mide el intervalo de tiempo Δt que demoran los extremos en pasar frente al indicador I, fijo en K, utilizando el reloj R, también en reposo respecto a K. En este caso se cumple que:

$$l_0 = V \cdot \Delta t \quad (7)$$

Un observador que está en reposo respecto a K también usa el reloj R y mide el tiempo Δt_0 que demoran los extremos de la barra, cuya longitud es l , en pasar frente al indicador I encontrando que:

$$l = V \cdot \Delta t_0 \quad (8)$$

Dividiendo la ecuación 8 entre la ecuación 7 tenemos:

$$\frac{l}{l_0} = \frac{\Delta t_0}{\Delta t} \quad (9)$$

de donde:

$$l = l_0 \frac{\Delta t_0}{\Delta t} \quad (10) \qquad \Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{(1-\beta^2)}} \quad (6)$$

sustituyendo Δt según la ecuación 6 se tiene:

$$l = l_0 \frac{\Delta t_0}{\frac{\Delta t_0}{\sqrt{(1-\beta^2)}}} = l_0 \sqrt{(1-\beta^2)} \quad (11)$$

y como $\sqrt{(1-\beta^2)}$ es siempre menor que 1 entonces el valor de l será menor que el de l_0 resultando entonces que la *longitud de la barra*, en la dirección en que se mueve, depende del sistema de referencia respecto al cual se mida.

De igual modo si la masa de un objeto en reposo en K' es m_0 la masa del mismo objeto medida en K (sistema respecto al cual el objeto está animado de la

velocidad V) será
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{V^2}{c^2}\right)}} \quad (12)$$

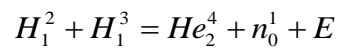
Al igual que ocurre con el tiempo las diferencias entre los valores de longitud y masa medidos en diferentes sistemas de referencia son notables cuando las velocidades relativas entre los sistemas son comparables con la velocidad de la luz en el vacío. En condiciones habituales los efectos relativistas no se manifiestan.

Uno de los resultados más trascendentes de la *teoría especial de la relatividad* es la conocida relación entre la masa y la energía:

$$E = m.c^2 \quad (13)$$

la cual tiene importancia particular en el estudio y empleo de las reacciones nucleares.

La reacción de fusión nuclear que es la principal fuente de energía de las estrellas y la utilizada por el hombre para la construcción de la peligrosa bomba de Hidrógeno ocurre cuando interactúan fuertemente los núcleos de dos isótopos de hidrogeno denominados *deuterio*, H_1^2 (constituido por un protón y un neutrón) y *tritio*, H_1^3 (un protón y dos neutrones) y como resultado se obtienen núcleos de Helio, H_{e2}^4 (dos protones y dos neutrones) neutrones, y el desprendimiento de una colosal cantidad de energía. Simbólicamente la reacción se puede escribir así:



fundamenta en ideas relativamente simples que son comprensibles para cualquier persona que haya rebasado el nivel medio de la Educación General.

En los fenómenos cotidianos no se manifiestan sensiblemente los efectos relativistas porque las velocidades de los cuerpos con los que normalmente se trata son mucho menores que la velocidad de la luz en el vacío.

Cuando se trabaja con objetos que se mueven a velocidades *comparables* con la velocidad de la luz en el vacío, ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) como en el caso de las partículas en los aceleradores o en el de los *rayos cósmicos*, al analizar los fenómenos y realizar los cálculos hay que tener en cuenta los efectos relativistas, de lo contrario los resultados que se obtienen no corresponden con la realidad.

BIBLIOGRAFÍA

Brédov, M. et... al... Electrodinámica Clásica. Editorial MIR. Moscú. 1986.

Chernín, A. Física del Tiempo. Editorial MIR. Moscú. 1990.

Dubrovski, V. et... al... El Mundo Relativista. Editorial MIR. Moscú. 1987.

Infeld, Leopold. ¿Qué dijo realmente Eintein?. Instituto Cubano del Libro. La Habana. 1973.

Irodov. I. E . Leyes fundamentales de la mecánica. Editorial MIR. Moscú. 1981.

Landau L, Rumer Y. Qué es la Teoría de la Relatividad. Editorial MIR. Moscú, octava edición. 1985.

Pérez, h. y Solbes, J. Algunos problemas en la enseñanza de la relatividad.

<http://www.bib.uab.es/pub/ensenanzadelasciencias/02124521v21n1p135.pdf>.

Vorobiov. I I. La Teoría de la Relatividad en problemas. Editorial MIR. Moscú. 1990.