

ESPACIO Y TIEMPO EN LA RELATIVIDAD ESPECIAL (*)

Mauricio García Castañeda

Departamento de Física
Universidad Nacional de Colombia

De acuerdo con la experiencia de la vida cotidiana, los conceptos de espacio y de tiempo son lo suficientemente claros como para reflexionar profundamente sobre ellos. Más aún, si desprevénidamente se formula la siguiente pregunta a cualquier persona “¿El Espacio y el Tiempo dependen del estado de movimiento del observador?”, se obtendrá un no rotundo. No existen evidencias en nuestro diario vivir, que muestren por ejemplo que dos relojes el uno en movimiento respecto al otro marchen a ritmos diferentes, o que al efectuar mediciones de longitudes se halle que dos cuerpos idénticos resulten de dimensiones distintas si se encuentran en movimiento relativo.

Las anteriores afirmaciones se pueden concretar en la suposición fundamental de la mecánica newtoniana, que dice: “El espacio y el tiempo son absolutos, es decir, independientes del estado de movimiento del observador”.

Además del carácter absoluto de espacio y tiempo existe en la denominada mecánica clásica un Principio de Relatividad, formulado por Galileo, y que puesto en un lenguaje moderno, es el siguiente: “Las leyes de la Física deben ser las mismas en todos los Sistemas Inerciales de Referencia”.

A continuación y para ser consistentes debemos examinar brevemente lo que es un Sistema Inercial de Referencia. Para empezar podemos decir que siempre que efectuamos una medición de alguna característica física, la hacemos (consciente o inconscientemente) respecto a un origen arbitrario. Arbitrariamente también fijamos en el espacio nociones como arriba, derecha, etc. Este conjunto de escogencias junto con el origen mencionado anteriormente constituye lo que se llama un sistema de referencia y es usual que el sistema de referencia adoptado sea un sistema cartesiano x, y, z .

Ahora bien, tal sistema de referencia es inercial, si en

él una partícula libre de toda influencia o más precisamente libre de fuerzas, conserva su estado de reposo o de movimiento uniforme. En otras palabras se busca que un sistema de referencia tal, el principio de inercia (1o. ley de Newton) se cumpla; de ahí el nombre.

De acuerdo con lo anterior, si un sistema de referencia se mueve con velocidad uniforme respecto a un sistema inercial de referencia, el primero debe ser también un sistema inercial de referencia. Ya podemos entonces examinar más precisamente el Principio de Relatividad de Galileo. Si dos observadores situados en dos sistemas de referencia inercial diferentes estudian determinado fenómeno, ambos deben llegar a concluir exactamente lo mismo.

Un observador (llamémoslo O) utilizará 3 variables $x - y - z$ para fijar coordenadas en el espacio, y utilizará un reloj con el cual medirá tiempos t , mientras el otro (O') empleará $x' - y' - z'$ para el espacio y t' para el tiempo, en su sistema de referencia. Sin pérdida de generalidad supongamos que el observador O' se mueve en la dirección $x-x'$ con velocidad V según se muestra en la siguiente figura.

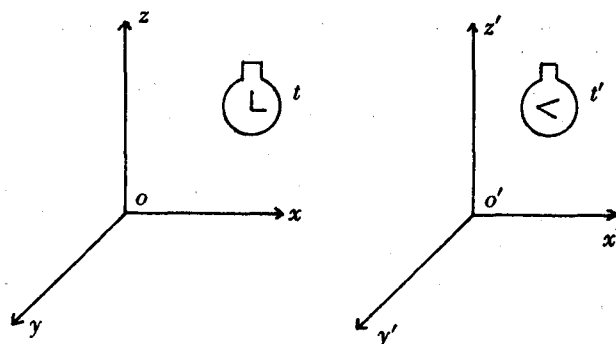


FIGURA No. 1 - Dos observadores O y O' en sendos sistemas de referencia inercial.

(*) Conferencia dictada con motivo del Centenario del Nacimiento de Albert Einstein, en la sesión organizada por la ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES y el DEPARTAMENTO DE FÍSICA de la Universidad Nacional de Colombia, el día 14 de marzo de 1979 en las instalaciones de la Biblioteca Nacional de Colombia.

Un ejemplo que puede servir para aclarar la situación es considerar que la caída de un cuerpo es analizada por dos observadores: uno sobre la calle, y otro desde un automóvil que se mueve con velocidad constante (se esta aceptando tácitamente que la tierra es un sistema inercial de referencia).

Si se pregunta a las dos personas cómo fue la trayectoria del cuerpo que cayó, obtendremos dos respuestas aparentemente antagónicas. En efecto: el primero de los observadores asegurará que la piedra sigue una trayectoria recta, mientras que el segundo de ellos asegurará que la trayectoria fue parabólica. Según el principio de Relatividad, el resultado debe ser único. Si el observador O (quien está sobre la calle) de acuerdo a la figura 1. utiliza las siguientes transformaciones:

$$\begin{aligned} x' &= x - Vt & t' &= t \\ y' &= y & z' &= z \end{aligned} \quad (1)$$

(suponiendo que en $t = t' = 0$ los orígenes de los dos sistemas de referencia coinciden) encontrará que la trayectoria fue parabólica, o si el observador O' (quien se encuentra en el automóvil) de acuerdo a la figura 1. emplea las transformaciones:

$$x = x' + Vt' \quad t = t' \quad z = z' \quad y = y' \quad (2)$$

encontrará que la descripción del otro observador es coherente.

El conjunto de ecuaciones (1) y (2) son las denominadas Transformaciones de Galileo las cuales garantizan que la Mecánica Newtoniana cumpla el principio de Relatividad. Se suele afirmar también que la Mecánica Clásica es *invariante* (que no cambia la forma de las ecuaciones) bajo transformaciones de Galileo.

En la historia del desarrollo de la Física se dio un gran momento de síntesis cuando en la segunda mitad del siglo pasado J. C. Maxwell logró explicar todos los fenómenos hasta entonces estudiados de la electricidad y el magnetismo. En efecto, lo que en la actualidad conocemos por Electrodinámica Clásica está por completo contenida en las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo se presentaba un serio inconveniente. A partir de las ecuaciones de Maxwell se puede predecir y explicar el comportamiento de las ondas electromagnéticas a partir de la llamada ecuación de onda, que no resultaba invariante bajo transformaciones de Galileo, y además predecía que el valor de la velocidad de propagación de las ondas electromagnética en el vacío, resultaba ser independiente de la velocidad de la fuente, cosa que claramente contrariaba no solamente el sentido común, sino también el marco teórico de la Física.

En el año de 1905 en un artículo titulado "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento", Albert Einstein, formula lo que hoy en día es conocida como la Relatividad Especial o Restringida con base en sólo 2 postulados, uno de los cuales es novedoso. El primer postulado, es el postulado de Relatividad; "Las leyes de la Física deben ser las mismas en todos los sistemas inerciales de Referencia", en donde por tratarse solo de sistemas inerciales la teoría recibió el apelativo de Restringida o Especial.

El segundo postulado es el de la constancia de la velocidad de la luz; "La velocidad de la luz en el vacío c es la misma en todos los sistemas inerciales de referencia, independiente del movimiento de la fuente".

La adopción del segundo postulado encierra grandes determinaciones: es aceptar que la electrodinámica descrita con base en las ecuaciones de Maxwell están correctamente formuladas, y que por lo tanto son las transformaciones de Galileo las que son necesario corregir. En consecuencia, la formulación Newtoniana de la Mecánica y toda la Mecánica Clásica debe ser tan sólo una aproximación y por tanto la Cinemática y la Dinámica deben poseer otra forma y tener otro sentido. En particular las variables cinemáticas de espacio y tiempo que sirven para definir otras cantidades como velocidades, aceleraciones, etc., deben sufrir profundas modificaciones.

Veamos las consecuencias del segundo postulado de la Relatividad Especial sobre el espacio y tiempo. La existencia de una velocidad absoluta, la velocidad de la luz, implica casi inmediatamente que ésta sea la máxima velocidad posible en la naturaleza (300.000 Km/seg. aprox.), y por consiguiente, la máxima velocidad de propagación de información, materia, energía, etc.

Este hecho nos induce ni más ni menos, a abandonar la idea de velocidades infinitas de propagación de información. Por tanto cuando existan dos o más observadores separados espacialmente, cualquier suceso que genere uno de ellos necesitará un tiempo distinto de cero para que el resto de observadores se enteren de lo ocurrido.

Por consiguiente, el concepto de simultáneo (o simultaneidad), pierde su carácter absoluto y se torna Relativo al observador particular. Realmente un suceso simultáneo (temporal o espacialmente) para un observador, puede no serlo para otro observador en movimiento relativo respecto al primero. Podemos analizar los siguientes ejemplos sencillos. Supongamos que una persona sobre la calle golpeó las palas de las manos dos veces. El asegurará que esos encuentros tuvieron simultaneidad espacial pues fueron hechos EN EL MISMO PUNTO DEL ESPACIO, aun cuando no exista simultaneidad temporal. Sin embargo, para cualquier otro observador que se mueva relativamente respecto al primero los dos sucesos no serán simultáneos ni espacial ni temporalmente. Este resultado no es del todo sorprendente. Tomemos ahora el siguiente caso: el mismo observador golpea al mismo tiempo (simultáneamente) sus manos contra el suelo (obviamente en dos sitios distintos), para el otro observador tampoco existirá simultaneidad temporal. (Eventualmente podría existir simultaneidad espacial).

Al tomar el tiempo asiladamente, obtenemos uno de los resultados más sorprendentes de la Relatividad Especial (no entraremos a derivaciones formales, más bien, enunciaremos el resultado), respecto al sentido común o a la experiencia cotidiana.

Al mirar de nuevo la figura 1. supongamos que el observador O mide de alguna manera tiempos (utilizando un reloj, contando pulsos de su corazón, por medio

de rayos de luz, etc.), de tal manera que O y el instrumento están en reposo el uno respecto al otro. Sea to el tiempo medido por O. Si el observador O' se mueve con velocidad v respecto a O el MEDIRA UN TIEMPO t dado por

$$t = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Como es de esperarse v siempre es menor que c y por tanto

$$1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

es siempre mayor que 1. Entonces t es mayor que to. Este resultado muestra cómo el tiempo es relativo al observador y se denomina DILATACION TEMPORAL. Se puede interpretar lo anteriormente expuesto diciendo que los relojes en movimiento andan más despacio, dilatando el tiempo. Es importante aclarar que este resultado es, primero: INDEPENDIENTE del mecanismo del reloj. Se pueden emplear varios métodos para medirlo, y segundo, que este resultado es COMPLETAMENTE SIMETRICO, es decir, que si O' es quien hace las mediciones en reposo respecto a su método para medir tiempos, entonces O medirá el tiempo dilatado si la velocidad relativa sigue siendo v.

Se puede observar también que el resultado de la dilatación temporal solo depende del cuadrado de la velocidad relativa y no de la dirección de tal movimiento. (Al fin y al cabo el espacio es homogéneo e isotrópico).

Lo discutido anteriormente sirve para definir el denominado TIEMPO PROPIO. Cuando se mide la evolución de determinado proceso físico, si el observador y el asunto investigado se encuentran en reposo el uno respecto al otro, se habrá medido el TIEMPO PROPIO de tal proceso.

Pasemos ahora a discutir el efecto que sobre el espacio tiene el 2o. postulado de la Relatividad Especial.

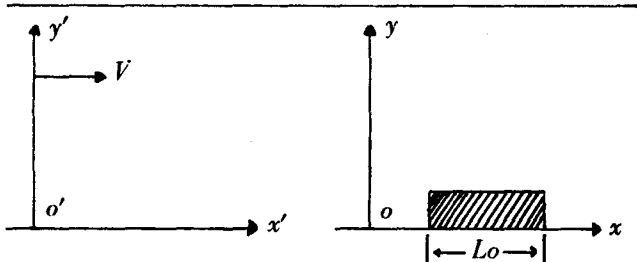


Fig. 2. - Medición de la longitud de una barra por dos observadores O y O' en movimiento relativo con velocidad uniforme v.

De acuerdo a la figura 2. se tiene un observador O que mide la longitud PROPIA de una barra Lo (es decir el observador O y la barra están en reposo el uno respecto al otro), y el observador O' se mueve con velocidad

uniforme v respecto a O. O' va a encontrar la siguiente medición para la barra:

$$L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

es decir contraída un factor $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ que es menor que 1.

Este resultado se conoce como la CONTRACCION DE LAS LONGITUDES O CONTRACCION DE LORENTZ-FITZGERALD, establecido a finales del siglo pasado por Lorentz y Fitzgerald para intentar explicar los resultados negativos del experimento de Michelson y Morley. Sin embargo, en ese momento no se conocía realmente el origen de tan "misteriosa contracción". Hoy se entiende que este efecto se debe a la constancia de la velocidad de la luz.

Podemos discutir ahora, por qué no son observables en la vida cotidiana tales efectos, y por qué estos resultados chocan con el sentido común. Tanto en la dilatación del tiempo como en la contracción de las longitudes interviene el factor $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Solamente en aquellas circunstancias en que la velocidad involucrada sea grande y se pueda comparar con la velocidad de la luz, se apreciarán estos resultados relativistas. En lo cotidiano las velocidades son del orden de los kilómetros por hora, cifras que son muy pequeñas comparadas con c. En estos casos v^2/c^2 tienden a cero y por tanto $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ tiende a 1. Así $t = t_0$; $L = L_0$, es decir, se obtienen los resultados clásicos sobre el carácter absoluto del espacio y el tiempo.

Para finalizar esta introducción a la cinemática Relativista, basta mencionar cuáles son las transformaciones que permiten pasar de un sistema inercial de Referencia a otro de tal manera que la Física resulta invariante y que además posea intrínsecamente el 2o. Postulado de la Relatividad. Tales transformaciones reciben el nombre de Transformaciones de Lorentz, y de acuerdo a la figura 1. se escriben como:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma' = \gamma; z' = z; t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

es interesante notar que en el caso de velocidades pequeñas v comparadas con c, de una manera espontánea se llega de nuevo a las transformaciones de Galileo, es decir, la reproducción del conocimiento clásico de la mecánica newtoniana, descripción aproximada de los fenómenos mecánicos en la naturaleza, pero lo suficientemente precisa en nuestro mundo, un mundo cuyo dominio de velocidades es bien pequeño comparado con la velocidad de la luz.

BIBLIOGRAFIA

1. The Principle of Relativity, H.A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowsky, H. Weyl. Dover, 1952.
2. Einstein's Theory of Relativity. Max Born, Dover, 1962.
3. Conceptos de Relatividad y Teoría Cuántica. Robert Resnick. Limusa, 1976.
4. J. Ewert, M. García. Conferencias Físicas IV, Departamento de Física, Universidad Nacional, 1979.