

el espacio, el tiempo y el yo

benjamín farbiarz
darío duque

En la Física, un observador localiza un evento por medio de cuatro números: tres coordenadas que dan su posición y un cuarto número para el instante correspondiente. La posibilidad de utilizar estos números en la física se explica por las mediciones correspondientes. La medición de tiempo es el producto de comparar un movimiento cualquiera con otro que se toma como referencia ⁽¹⁾.

Las mediciones para la posición relativa al observador consisten de tres medidas no coplanares. Este procedimiento de medición no requiere, en forma alguna, suposiciones sobre un espacio; en particular el observador puede realizar las mediciones sin formular que, necesariamente, existe el espacio de la física clásica; asimismo puede realizar las mediciones de tiempo sin pensar que exista un tiempo universal, el Tiempo. De esto se sigue que hay una diferencia entre el uso de un sistema de coordenadas cartesianas y la suposición de que existe un espacio independiente de cualquier observador y por tanto de una teoría. La posibilidad de realizar algunas mediciones, como las de longitudes con una cinta, no es un problema que tenga que discutir una teoría física. Es parte de lo que se podría llamar un pensamiento técnico y la física parte de ella así como comienza a precisar sus conceptos a partir del lenguaje corriente; en efecto, no podría partir de otro lugar.

Cualquier observador puede desarrollar una teoría física. Sin embargo, con el fin de obtener

una teoría lo más general posible, se ha desarrollado una para observadores que son partículas libres, es decir, que no están sometidos a interacciones. La posibilidad de que un observador esté en esta situación depende de las características del problema que se estudia. Por ejemplo, para analizar la caída de un cuerpo cerca de su superficie, la tierra puede ser considerada como libre, pues en intervalos pequeños de tiempo su movimiento es muy próximo a uno rectilíneo uniforme. Lo anterior es válido para todo observador inercial. Se plantea entonces el problema de las relaciones que existen entre las mediciones de dos observadores inerciales que se mueven con velocidad relativa constante. En la construcción de estas relaciones o sistemas de transformaciones entran, como se verá, suposiciones o teorías sobre las características de espacios y tiempos de cada observador; estas suposiciones, en cualquier caso, han de dar lugar a transformaciones que sean compatibles con el principio de relatividad, según el cual las leyes de la física son las mismas en cualquier sistema inercial. Para evitar el trabajo de reformar un texto, preferimos citar lo:

“A pesar de la más diligente búsqueda nadie ha encontrado nunca una violación del siguiente principio:

Todas las leyes de la física son las mismas en cualquier sistema inercial de referencia.

Nosotros denominaremos a esta proposición el principio de relatividad. Según él, una vez que las leyes de la física han sido derivadas en un sistema inercial, ellas pueden ser aplicadas sin modificación a cualquier otro sistema inercial. Tanto la forma de las leyes como los valores numéricos

1. El movimiento que se toma como referencia es el de un reloj, que a su vez se define por una relación con el movimiento de la tierra alrededor de su eje.

de las constantes físicas que estas leyes contienen son iguales en todos los sistemas inerciales; ellos son equivalentes con respecto a cualquier ley. Para expresarlo en términos negativos, el principio dice que las leyes físicas no permiten distinguir un sistema inercial de otro.

Es importante señalar también algunas de las cosas que este principio no dice. No dice, por ejemplo, que el tiempo entre dos eventos A y B es el mismo cuando se mide desde dos sistemas inerciales distintos. Tampoco afirma que la separación espacial entre estos eventos sea la misma para los dos sistemas. En general, ni los tiempos ni las distancias son los mismos... Lo que se mantiene invariable son las leyes y las constantes que en ellas intervienen".

Taylor y Wheeler, Spacetime Physics, págs. 12-13.

En otras palabras, el sistema de transformaciones que da la relación entre las mediciones de dos observadores inerciales de un conjunto de eventos debe ser tal que aplicado a las leyes físicas deducidas por uno de ellos, éstas permanezcan invariables. De esta forma, las leyes serán las mismas para el otro observador.

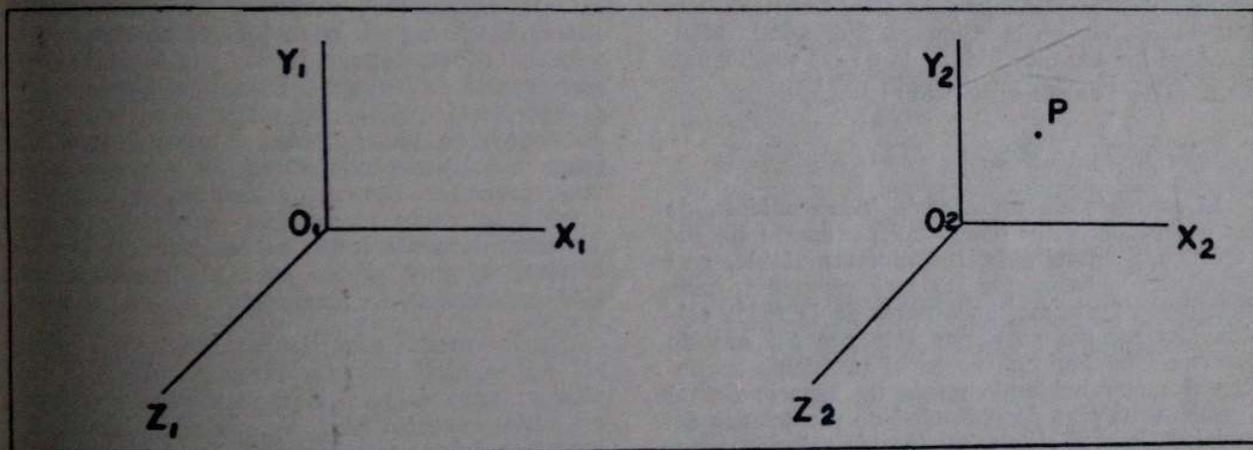
Conviene señalar por qué no sólo debe haber validez general para las leyes sino también para las constantes. Si se considera la expresión para la magnitud de la fuerza de gravitación entre dos masas:

$$F = \gamma \frac{m m'}{r^2} \text{ aparece allí } \gamma, \text{ la llamada cons-}$$

tante de Cavendish. El valor de γ se puede encontrar por medio de la balanza de torción de Cavendish y esta práctica la puede hacer un observador inercial cualquiera. El funcionamiento del sistema no se verá afectado por el movimiento uniforme de un observador respecto a otro, y en consecuencia γ debe tener el mismo valor para todos los observadores. Lo mismo se puede decir de cualquier otra constante.

La física clásica se planteó el problema de encontrar un sistema de transformaciones entre dos observadores inerciales en la forma en que lo hemos señalado y la solución que encontró para esto fueron las transformaciones de Galileo. Veamos en qué consiste esta solución y qué suposiciones (tácitas en la mayoría de los textos) la fundamentan.

Si O_1 y O_2 son observadores inerciales, O_1 determina que O_2 tiene velocidad \vec{V} , constante, y concluye que él, O_1 , se mueve con referencia a O_2 con velocidad $-\vec{V}$. En el caso general la trayectoria de O_2 será una recta que no contiene la posición de O_1 . El sistema de ejes de O_1 se puede tomar de tal forma que el eje X, sea paralelo a dicha recta; los ejes para O_2 se toman paralelos a los de O_1 . Sin perder ninguna generalidad se puede considerar el caso en que O_1 esté en la trayectoria de O_2 . Esto da lugar a ecuaciones más simples, pero no se hace, como argumentan muchos, porque sea más simple (mucho más simple para casi todos sería no hacer nada).



Ambos observadores pueden estudiar el movimiento de P. Las transformaciones de Galileo se fundan en la posibilidad de escribir que

$$\vec{L}_1 = \vec{O}_1\vec{O}_2 + \vec{L}_2 \quad (1)$$

donde \vec{L}_1 : vector de posición de P respecto a O_1

\vec{L}_2 : vector de posición de P respecto a O_2

Sin embargo, en rigor, cada observador escribe una ecuación de éstas, en que los términos correspondientes no son necesariamente iguales.

Por tanto para O_1 :

$$(\vec{L}_1)_1 = (O_1\vec{O}_2)_1 + (\vec{L}_2)_1$$

$(\vec{L}_1)_2 = (O_1\vec{O}_2)_2 + (\vec{L}_2)_2$, donde el paréntesis con índice señala quién hizo la medición.

Esta diferencia, que en principio parece una sutileza, es muy importante (todo lo formal es importante porque forma o constituye), al señalar que no hay ninguna razón para que el vector \vec{L}_1 , por ejemplo, medido por O_1 , sea el mismo que

mide O_2 . Las mediciones espaciales son un producto particular de un observador, de tal forma que su espacio es también particular y depende (comparado con el de un observador distinto) de unas condiciones especiales. Si se acepta como evidente que ambas mediciones son iguales es

$$(\vec{L}_1)_1 = (\vec{L}_1)_2 = \vec{L}_1 \quad (2-A)$$

$$(\vec{L}_2)_1 = (\vec{L}_2)_2 = \vec{L}_2 \quad (2-B)$$

$$(O_1\vec{O}_2)_1 = (O_1\vec{O}_2)_2 = O_1\vec{O}_2 \quad (2-C)$$

Para O_1 , $O_1\vec{O}_2 = \vec{V}T_1$ (las mediciones de tiempo son en principio distintas).

Para O_2 , $O_1\vec{O}_2 = \vec{V}T_2$

Según (2-C): $\vec{V}T_1 = \vec{V}T_2$ luego $T_1 = T_2 = T$.

Como se ve, una vez supuesto el Espacio de su mano viene el Tiempo. (Parece ser que en el periodismo colombiano ocurre lo mismo, y viceversa). De esta forma, las transformaciones de Galileo consisten en la siguiente ecuación:

$$\vec{L}_1 = \vec{V}T + \vec{L}_2$$

La suposición de que las mediciones espaciales de O_1 y O_2 son las mismas en cualquier dirección se substituye, en la relatividad de Einstein, por la de que son las mismas en las direcciones perpendiculares al movimiento relativo de ambos, es decir, que no hay identidad en la dirección del movimiento; de allí resultará que tampoco la hay en los tiempos. Suponer la identidad en los tiempos induce la de las mediciones en la dirección del movimiento relativo:

$$T_1 = T_2 \rightarrow \vec{V}T_1 = \vec{V}T_2 \rightarrow (O_1\vec{O}_2)_1 = (O_1\vec{O}_2)_2$$

El concepto de un espacio independiente de los observadores, es decir, independiente de sus mediciones, inalterable, infinito, inmutable, casi divino, un espacio que no será construido sino dado como fantasma, hace parte de la física clásica. Las razones para que esto sea así son de varias clases. Por una parte, el problema se podría enunciar hablando no de un espacio de tal o cual forma sino de identidad de mediciones espaciales (la medición es un tipo de relación constructiva; se trataría de suponer relaciones universales). La validez de esta suposición estaría fijada por el desarrollo de la teoría y por sus relaciones con la experimentación (cabe notar que no hay experimentación pura; los experimentos son comprendidos siempre según una teoría). En la historia de la física resulta claro cómo este proceso ha delimitado las condiciones de validez de este supuesto.

Y aunque el creer en relaciones universales sea muy grato para tanto espíritu que anda por ahí, resulta asaz curioso que se vaya más allá y se diga que las mediciones son las mismas porque lo medido es lo mismo, el Espacio, con todas las sus virtudes que hemos señalado. En todo

caso porque se piensa en términos de un discurso en el cual existe un espacio independiente de cualquier observador (el Espacio).

Con este supuesto espacial trabaja la física clásica para desarrollar las transformaciones de Galileo de la siguiente manera:

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \rightarrow \vec{L}_1 = O_1\vec{O}_2 + \vec{L}_2$$

en el centro está el Yo afirmando esto⁽²⁾. Así pues, el Espacio sería como un escenario donde el Yo, de pie sobre un pequeño promontorio y divisando ante sí un campo de césped verde muy bien cortado con algunos árboles en espesura hacia la lejanía y unas montañas mucho más lejos aún, discurre sobre las cosas mientras transcurre el Tiempo. Qué tal si colocáramos a este sujeto en el fondo de una cañada llena de árboles, donde corre un río de espuma que brinca por las piedras y cae retumbando peñascos y él ya no está quieto sino moviéndose entre todo esto. Este Espacio resulta ser un recinto muy seguro donde no se agita la vida; como ciertas medicinas, calma muchos dolores y penas a quienes no desean ni aman los movimientos (bruscos, como en la cañada, o pausados).

Por lo demás, este concepto de Espacio, que en ninguna forma es criticado por los textos de la ciencia universitaria ("ni más faltaba, darle qué pensar a gente tan ocupada: lo necesario, nada más que lo necesario"), da pie al planteamiento de ese otro sueño, el Eter; éste sería la sustancia de aquél, o mejor, él mismo, con un nombre especial para hacer parte de la teoría ondulatoria de Huygens. Porque el Espacio, como el Eter, está quieto con respecto a todo y se lo encuentra en todas partes. Ambos fueron fieles hasta las últimas consecuencias y, como los héroes, murieron juntos. El Tiempo es una figura semejante, corre inexorable desde los orígenes (inexorablemente lento en las fábricas y en los escritorios, muy rápido para el deudor; a quien está creando no le interesa).

Curiosamente este tiempo continuo y universal no es estrictamente tampoco el de la física clásica; para ésta, el tiempo vuelve a comenzar en cada experimento, en cada problema. Este conjunto de supuestos comenzó a derrumbarse en la física hace algo más de un siglo. Las leyes de la mecánica junto con el principio de relatividad y las transformaciones de Galileo constituyen un conjunto coherente. Sin embargo, no ocurre lo mismo con respecto a las ecuaciones del campo electromagnético formuladas por Maxwell. De las transformaciones de Galileo se derivan dos consecuencias que es importante anotar. En primer lugar, no imponen ningún límite a la magnitud de la velocidad de una partícula; por otra parte implican que una partícula no puede tener la mis-

2. "Las cosas se pueden tocar, yo las puedo tocar, yo las puedo medir". En realidad es este tocar, tan particular, este medir, el que hace al yo.

ma velocidad para 2 objetos inerciales en movimiento relativo. Las leyes de Maxwell dan lugar a una serie de contradicciones si se dan por formaciones de Galileo, pues no permanecen invariables bajo estas transformaciones. Ante este problema se pensó que la falla provenía de la teoría electromagnética; inclusive se la reformó, agregando una serie de términos necesarios para que permanecieran invariables, pero la experimentación refutó ambas posibilidades. La validez del principio de relatividad puede ser puesta en duda, en este caso, pero la experimentación permite deducir las mismas leyes para dos observadores inerciales en movimiento. Además, en las leyes de Maxwell aparece una constante C que es la velocidad con que se propaga un campo electromagnético en el vacío. Esta velocidad, una constante que hace parte de una ley física, debe ser la misma para cualquier observador, contradiciendo así a las transformaciones de Galileo.

La formulación de este problema resulta simple y ya tradicional si se hace referencia a una onda electromagnética en especial, la luz.

Sólo en el Siglo XIX, luego de Maxwell, se pensó en la luz como una onda electromagnética; sin embargo, desde mucho antes, con Huygens, se formuló una teoría ondulatoria para la luz, alterna de la corpuscular de Newton. El concepto de onda es originario de la mecánica, en la cual el movimiento cíclico y relacionado de un conjunto de partículas se traduce en un desplazamiento de energía: esto es la onda. Obsérvese que este movimiento de energía es, en mecánica, consecuencia de un movimiento de partículas. Cuando Huygens propuso que la luz era una onda, (movimiento de energía) tuvo que suponer un medio mecánico responsable de la transmisión, al que se denominó éter. Este nueva sustancia sustituía un número mucho mayor de corpúsculos coloreados; los físicos trataron de determinar sus características mecánicas, pero siempre hubo fallas en este sentido.

Si el éter, según se suponía, era el medio de transmisión de la onda luminosa (y a partir de Maxwell, de la onda electromagnética) el comportamiento de la luz respecto al éter debería ser análogo al de otra onda mecánica con respecto a su medio de transmisión. Un caso comparativo que ilustra algunos puntos es el del sonido. Sin embargo al considerar los dos problemas es necesario señalar una diferencia entre ambos: en el sonido, el medio de transmisión, llamémosle el aire, o bien el agua, tiene un conjunto de características mecánicas teóricas que es posible comprobar por otra serie de experimentos, es decir, se trata de un concepto cuyas consecuencias teóricas no dan lugar a contradicciones en la física clásica. La existencia del éter se da en un contexto teórico tal como la del aire, aunque en principio esto resulte paradójico, pero a diferencia de éste, aquél conduce a predicciones que no son compatibles con experimentos analizados, en consecuencia, desde este punto de vista.

En el libro "La física, aventura del pensamiento", Einstein utiliza esta comparación entre la luz y el sonido. Aquí expondremos con pala-

bras nuestras algunos de los aspectos que él señala allí.

En la propagación del sonido el movimiento de la onda de presión depende, en primer lugar, del medio transmisor, que aquí reduciremos al caso del aire; pero además, depende también de que quien estudie el problema se encuentre en reposo o en movimiento con relación a la fuente emisora de la onda y/o al aire que la propaga.

El ejemplo que Einstein propone es bastante claro. Se puede considerar un observador en reposo con respecto a una fuente sonora y a la masa de aire circundante, y otro que tiene movimiento uniforme respecto al primero, quien determina que el sonido tiene igual velocidad en todas direcciones. El segundo, por el contrario, deberá encontrar diferentes velocidades en distintas direcciones. Estas aseveraciones son comprobables experimentalmente por medio de los supuestos de la mecánica clásica y además las mediciones de ambos observadores son coherentes con las transformaciones de Galileo. La propagación de la luz (de una onda electromagnética en general) da lugar a una serie de problemas distintos. Ya señalamos como la velocidad de propagación C , de acuerdo con las ecuaciones de Maxwell debía ser la misma para todos los observadores⁽³⁾.

Esto en primer lugar indica que la propagación de la onda es independiente del movimiento de la fuente. Por tanto, en relación con el supuesto medio de propagación, el éter, la velocidad de la luz debe ser siempre C . Pero entonces, si se aceptan las transformaciones de Galileo, un observador que esté en movimiento con respecto al éter no puede medir la velocidad C para un rayo de luz en la dirección de su movimiento, pues de estas transformaciones se deduce, como se vio, que una partícula no puede tener la misma velocidad respecto de dos observadores en movimiento relativo.

Como se ve, en un momento dado se reunieron un conjunto de elementos teóricos que debiendo ser coherentes no lo eran. Por una parte estaban:

- a) El principio de relatividad.
- b) Las transformaciones de Galileo, es decir, una construcción teórica que llamamos el Espacio y su hermano el Tiempo.

Y de otra, otra construcción teórica, las ecuaciones de Maxwell, que aquí representamos por

- c) La constancia de la velocidad C de la luz para todos los observadores.

No es posible como se vio, mantener la validez simultánea de estos tres puntos. Es interesante señalar que en estos tres puntos confluyen dos campos de experimentación diferentes que podemos llamar el mecánico y el electromagnético. De hecho, aún en la teoría de Maxwell se mantiene una relación estrecha con el punto de vista mecánico, pues aunque el tipo de fuerzas que allí

3. Recuérdese que C aparece allí como una constante de una ley que, según el principio de relatividad, debe ser la misma para todo observador inercial.

aparecen no son las tradicionales de la mecánica newtoniana (entre dos partículas y sobre la línea que las une) y, aún más, el concepto de campo electromagnético desplaza completamente al de fuerza electrostática, la pregunta sobre el medio de propagación de este campo era respondida mecánicamente mediante el concepto de éter. Sin embargo, con esto se señala claramente la posibilidad de dar a esta última pregunta una respuesta diferente, sin que por ello se vea afectada la teoría que se resume en las ecuaciones de Maxwell. Por lo tanto, lo que se necesitaba para resolver el problema era la posibilidad de pensar en la existencia, digamos, de experiencias fraccionadas y diferentes (4).

La teoría de la mecánica y sus supuestos no resultaron, como se anhelaba, universales; con esto, la idea misma de universo quedó bastante coja y resultó la alternativa, más atractiva, de problemas particulares y distintos.

De esta forma, la incoherencia entre los tres puntos señalados antes debía ser resuelta por medio de experimentos que permitieran chequear simultáneamente los tres puntos en cuestión.

Es sencillo plantear las condiciones que un experimento debe tener para permitir resolver el problema. Al hacerlo, suponemos que el observador en reposo con respecto al laboratorio se mueve uniformemente respecto al éter (como ese observador seré yo u otro, sería concedernos demasiada importancia y demasiada rigidez el pensarlos en reposo en el éter, en el espacio, en el recinto del universo). Esta condición, pensaron los físicos, era llenada por la tierra si se considera un intervalo de tiempo bien pequeño, porque en él recorre un arco de elipse alrededor del sol, que se puede asumir como un segmento rectilíneo, con velocidad que no varía en magnitud (la cortedad del intervalo se desprendía del trabajo con la luz, que tiene una velocidad mucho mayor que la orbital terráquea) (5).

Este observador, al experimentar, supone varias cosas: las transformaciones de Galileo y sus implícitos son ciertas; la velocidad de la luz es C con respecto al éter. El debe realizar un experimento que le permita definir, aunque sea de manera indirecta, si un rayo de luz que se propaga en la misma dirección del movimiento uniforme de la tierra tiene o no igual velocidad que otro que se propaga en cualquier otra dirección. Si la velocidad no es la misma en los dos sentidos toda la gente cuerda puede respirar tranquila,

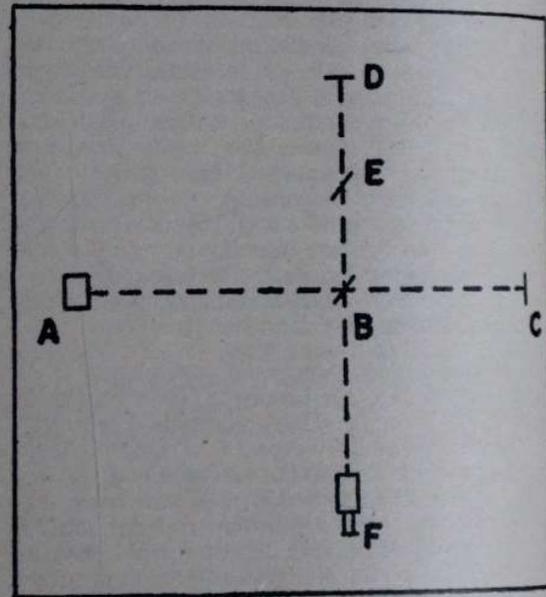
4. La palabra experiencia no hace alusión a la separación tradicional entre teoría y práctica en la medida en que los experimentos son siempre analizados desde un punto de vista y que este punto de vista es una teoría construida con relación a una experiencia práctica determinada.

5. Resulta un poco irónico el hecho de que los supuestos espaciales en relación con una situación particular parezcan tan a menudo los del universo: es desde el punto de vista de un observador en reposo con respecto al sol desde donde la tierra tiene el tipo de movimiento descrito, si el problema se estudia en rigor; sin embargo, allí lo que se veía era el éter, el espacio, y no un conjunto particular del lenguaje teórico y mediciones técnicas relacionadas.

pues sus sentimientos sobre el Espacio, el Tiempo y el Yo, como vimos, siguen tan firmes y empolvados como de costumbre; si la velocidad es la misma, se habrá erigido un nuevo dios, por el momento, rayo de luz, (¿otra vez?), pero, y esto resulta muy atrayente, el Espacio y el Tiempo habrán dejado de existir, naciendo los espacios y los tiempos.

Las condiciones de este experimento fueron materializadas por Albert Michelson y luego en rigor, por A. Michelson y Eduard Morley en una serie de pruebas realizadas en 1887 en Cleveland (U.S.A.) las características del experimento están detalladas en el artículo "Sobre el movimiento relativo de la tierra y el éter luminífero" publicado por ambos en American Journal of Science, tercera serie, vol. 34, y que está reproducido en el libro "La teoría de la relatividad" de la editorial Alianza Universidad. Aquí expondremos el esquema que se conoce comúnmente, que no reúne todas las características técnicas que son necesarias para trabajar con una velocidad muy grande pero que permite señalar los resultados del experimento y deducir algunas conclusiones.

En el laboratorio que está en reposo respecto a la tierra, la luz recorre una distancia de 22 metros en $\Delta T \approx 22/3 \times 10^8$ segundos; en un lapso así se puede considerar como uniforme el movimiento del conjunto.

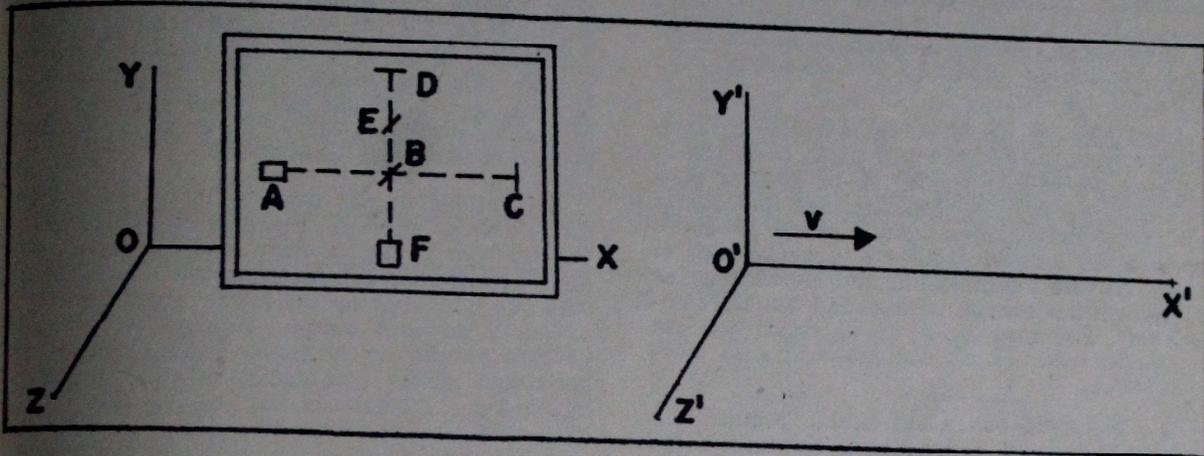


En la figura A es una fuente de luz (Michelson y Morley utilizaron luz amarilla de radio, monocromática); un rayo de luz emitido por A es parcialmente reflejado hacia D y parcialmente refractado hacia C por el espejo B. El eje AC se orienta paralelo al movimiento terráqueo y los brazos BC y BD tienen la misma longitud L . Los rayos son reflejados en los espejos D y C y se reúnen nuevamente en B, de donde pasan superpuestos a un interferómetro colocado en F. Con este interferómetro es posible detectar una diferencia de fase entre los dos rayos superpuestos que debía presentarse de acuerdo a las transformaciones de Galileo, en el supuesto de que la ve-

locidad de la luz era C en el éter y la tierra se movía respecto a éste con velocidad V (6). En el trayecto BD se coloca un vidrio E para compensar el aumento en el recorrido del rayo BC al pasar dos veces por B .

Veamos cuales son los resultados que según los supuestos debe dar el experimento. Llamemos O' un sistema inercial fijo en el éter y O a uno en el laboratorio, donde la velocidad relativa entre O y O' es V , de tal forma que para O , O'

(el éter) se aleja con velocidad V . O va a efectuar mediciones con el interferómetro y sabe que para O' , la velocidad de la luz es C en cualquier dirección (puesto que supone que la luz es una onda que se propaga por vibraciones del éter), deduce entonces, en términos de C , V y L las velocidades de los rayos de luz en las trayectorias $B-C-B$ y $B-D-B$ y con éstas los tiempos de recorrido; la diferencia entre ambos tiempos la debe poder detectar por medio del interferómetro F .



Según Galileo $VO = VO' + V$, para velocidades en la dirección de OX , $Vo = Vo'$ para velocidades en la dirección de OY y OZ . En el trayecto BC la velocidad del rayo en O' es $Vo' = C$, por tanto, $Vo = C + V$. En la parte CB , $Vo = C - V$. En consecuencia, en el camino $B-C-B$ la luz emplea un tiempo

$$\frac{L}{C+V} + \frac{L}{C-V} = \frac{2LC}{C^2 - V^2} = \frac{2L/C}{1-V^2/C^2} \text{ segs.}$$

En el camino $B-D-B$ la velocidad de la luz será la misma para O y O' y el tiempo empleado

$$\text{será } \frac{2L}{C} \text{ segs.}$$

Como se ve, de los supuestos hechos se desprende una diferencia de tiempo en las dos trayectorias de $\Delta T = \frac{2L}{C} \left(-1 + \frac{1}{1-V^2/C^2} \right) = \frac{2V^2L/C}{C^2 - V^2}$ segs. Como consecuencia de esto los dos rayos de luz se superponen con la correspondiente diferencia de fase, porque inicialmente, al salir el rayo de A , no estaban desfasados. Esta dife-

rencia se puede medir en F y de allí deducir el valor de ΔT y, en consecuencia, el de V . De casi todos es sabido cuál es el resultado que se obtiene del experimento. Michelson y Morley encontraron que esta velocidad V era cero, con un grado de precisión de una sexta parte de la velocidad de la tierra, es decir, que la velocidad de la luz para O , en el laboratorio era la misma, C , con un margen de error de $1/6$ de la velocidad orbital, o bien de $1/60.000$ con respecto a C . Pruebas posteriores más delicadas han reducido este margen a $3/10^6$.

Este resultado podría ser interpretado en el sentido de que la tierra arrastra el éter, pero esto da lugar a una serie de contradicciones respecto a la estructura mecánica de éste. No faltaría quien afirme entonces que Galileo se equivocó, que el resultado demuestra que la tierra donde vive el Hombre está en reposo absoluto; sueño baladí y aburridor.

El experimento, una vez realizado, demostró que la velocidad de la luz es la misma en todas direcciones para cualquier observador, que es isotrópica (7). Esto no quiere decir que también el valor de esta velocidad sea el mismo para todos los observadores (en efecto, en la prueba no se mide este valor). Sin embargo, de acuerdo al principio de relatividad, el valor de la constante C en las ecuaciones de Maxwell debe ser el mismo para todo observador inercial. Esto fue comprobado con una precisión de $1/10^8$ por R. J. Kenedy y E. M. Thorndike en 1932 en Pasadena (USA), quienes realizaron la medición para dos

6. Como lo manifiesta el título del artículo de M. y M. el objetivo del experimento era la determinación de esta velocidad V respecto al éter; esto señala que en ese momento no se ponía en cuestión ni la validez de las transformaciones de Galileo ni el concepto de éter.

7. Aquí cualquier observador no es cualquier observador: es cualquier observador en una de muchas situaciones posibles

posiciones de la tierra en que ésta se movía en direcciones opuestas, ("una vez en Enero y otra en Julio"). Con esto las mediciones fueron hechas por dos observadores con una diferencia de velocidades, en la misma dirección, de 60 kms/seg.

Estos resultados se pueden resumir así: la velocidad de la luz tiene el mismo valor en cualquier dirección para todo observador inercial. Si a esto se suma la deducción de las leyes de Maxwell según la cual la propagación de una onda electromagnética es independiente del movimiento de la fuente, se obtiene que dos observadores en movimiento relativo medirán la misma velocidad en cualquier dirección para un mismo rayo de luz.

Esta última proposición reúne varias características importantes. Por una parte confirma la validez del principio general de relatividad para el caso de las leyes de Maxwell (es importante señalar que esta validez depende de un grado de precisión en los resultados del experimento; el énfasis en este punto señala que la física no es una ciencia tan exacta, pero sí una ciencia emocionante). Por otra parte da al trasto con las transformaciones de Galileo respecto a la electrodinámica.

Este resultado obliga entonces a asumir una serie de supuestos distintos con respecto a las relaciones entre las mediciones espaciales y de tiempos de dos sistemas en movimiento relativo, que den lugar a un nuevo sistema de transformaciones compatibles con los nuevos resultados. De inmediato (tal vez) surge una pregunta con respecto a las leyes de Newton, que no dan lugar a contradicciones con Galileo: ¿qué pasa con ellas? La solución no puede ser la de que en un caso las relaciones entre las mediciones son unas y en el otro otras. Plantear nuevos supuestos espaciales implica cambiar las leyes de la mecánica, y este cambio no puede ser arbitrario, más aún cuando esta mecánica clásica es verdadera dentro de su orden de experimentación. Einstein planteó el problema y lo resolvió; una explicación de esta solución no se puede limitar a señalar que propuso la variabilidad de la masa con la velocidad, porque este hecho está en relación con una serie de problemas más amplios de la teoría general de la relatividad.

Como aquí estamos tan especializados, nos limitaremos a plantear el problema sólo en los términos en que veníamos haciéndolo.

Los nuevos supuestos espaciales (en las transformaciones de Galileo está implícito que las mediciones espaciales comunes de dos observadores no se veían afectadas por un movimiento relativo, o bien que se mueven en el espacio), los nuevos supuestos deben dar lugar a transformaciones que sean compatibles con la constancia de C para cualquier observador. Del análisis del experimento de Michelson y Morley se puede anotar que las transformaciones de Galileo contradecían esta constancia para rayos que se propagaban en la dirección del movimiento relativo de los dos sistemas, mientras que si su propagación era en un sentido perpendicular a dicho movimiento esta velocidad era la misma. En consecuencia desde el punto de vista que hemos tratado de señalar

según el cual un observador puede trabajar con ejes de referencia sin necesidad de hacer formulaciones demasiado universales como la del Espacio, la suposición de que las mediciones de una misma longitud eran iguales e isotrópicas para dos observadores en movimiento relativo se puede sustituir por otra en la que las únicas mediciones que no se ven afectadas por tal movimiento son aquellas en direcciones perpendiculares a éste. En tales condiciones si los dos observadores miden la longitud de, como dicen, un mismo cuerpo, obtendrán diferentes medidas siempre que el cuerpo no esté orientado normalmente al movimiento. La relación entre ambas medidas dependerá, claro está, de su velocidad relativa; y sobre todo cabe señalar que al deducir estas relaciones se debe partir del hecho teórico-experimental de que la velocidad de un rayo de luz es la misma para todo observador.

La validez de las nuevas suposiciones sobre las relaciones entre las medidas de ambos observadores sólo puede ser examinada si se la considera en conjunto con los experimentos y problemas que con ellas los físicos se propusieron explicar. Y en este sentido, aunque en principio parezca paradójico, lo mismo ocurre con las suposiciones tácitas (evidentes) que sobre esta relación entre mediciones hay en las transformaciones de Galileo. Sin embargo, de uno a otro caso hay una diferencia notable: en la relatividad de Einstein ya no hay ningún Espacio universal; allí el espacio de un observador "es producto de los objetos y los movimientos", y las condiciones de un observador son irreducibles a las de otro (intraducibles); lo que puede hacer una teoría es relacionarlas. Este fraccionamiento no se presenta en un sitio aislado de la teoría de Einstein; un embate contra las concepciones demasiado universales aparece en otros puntos paralelamente con la construcción de la relatividad general.

La diferencia se manifiesta a muchos niveles. En la física clásica los hombres andan por el llamado mundo exterior; en la teoría de Einstein (o mejor en ella y a partir de ella) los hombres y el mundo exterior quedan relegados en la despena y lo que se formulan son relaciones entre elementos que sólo se pueden definir dentro de esas relaciones; no existen en general para luego ser reunidos. En la medida en que se considera la existencia de relaciones y condiciones muy particulares (Einstein quería hacer una física válida para cualquier observador), que son irreducibles o intraducibles entre sí (como lo señala en "La física, aventura del pensamiento") pierde todo sentido un concepto como el de Espacio, que era precisamente el medio de equivalencia y de traductibilidad clara y transparente entre todos los observadores (y también de los observadores).

Es curioso también cómo al disolverse este Espacio que contenía al Universo (que pareja más pareja) se va también el Tiempo. Aún antes de Einstein y dentro de la física, Ernst Mach había puesto en entredicho el tiempo clásico, y llegó a señalar que no existe tal sustancia; hay tan sólo una medición comparativa entre movimientos por parte de un observador que, como

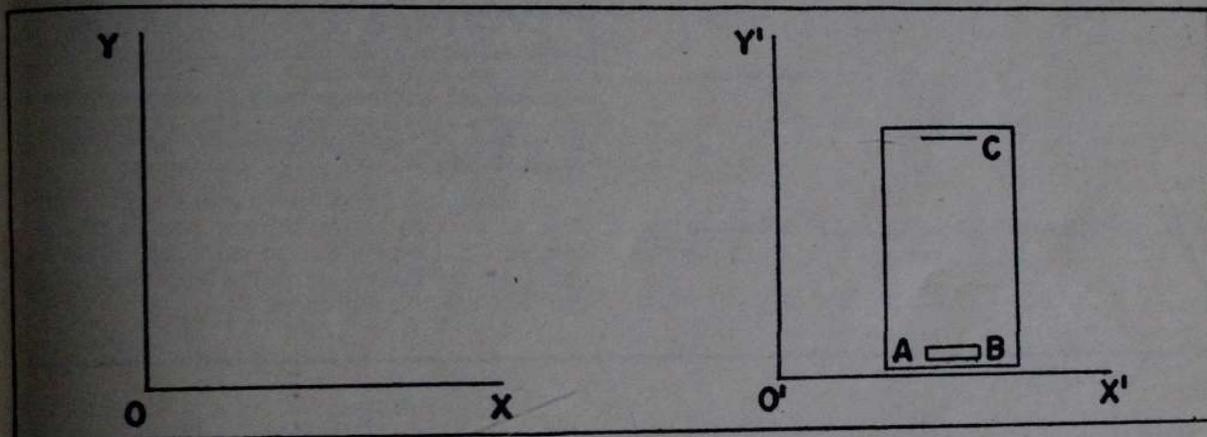
velamos, es el producto de condiciones muy particulares⁽⁹⁾. Por todas partes el fraccionamiento: se trata, en todo caso y paradójicamente, de proposiciones mucho más simples y naturales, menos trascendentales y menos cargadas de obligaciones.

La nueva suposición respecto a la relación entre las medidas de dos observadores distintos, no conlleva ninguna formulación sobre un espacio universal; en rigor, la suposición anterior tampoco; pero aquí, en la nueva, ya no hay posibilidad de tal espacio, la única homogeneidad en medidas está restringida por las condiciones particulares de los dos observadores: se da para mediciones en direcciones perpendiculares a su movimiento relativo; aquí se manifiesta la irreducibilidad entre ambos observadores cuyas medidas se pueden relacionar en base a una suposición⁽⁹⁾.

Para deducir un nuevo sistema de transfor-

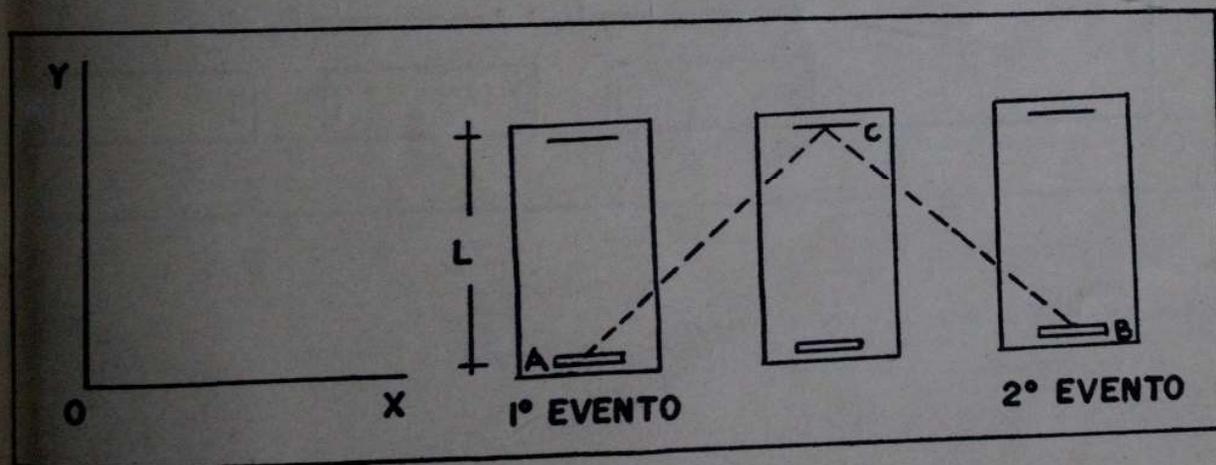
maciones (el de Lorentz) partiremos de dos puntos: la constancia de la velocidad de la luz y el nuevo supuesto. Deduciremos en primer lugar la relación numérica entre los intervalos de tiempo entre dos eventos medidos por dos observadores en movimiento relativo, y la relación entre las longitudes medidas para un cuerpo que reposa con respecto a uno de los dos.

Para los intervalos temporales tomamos un proceso cuyo desarrollo compara cada observador con un reloj en reposo en su sistema; en este proceso se hace recorrer a un rayo de luz una distancia orientada en la dirección normal al movimiento relativo, y ambos observadores miden con un reloj el tiempo en que el rayo de luz recorre tal distancia, la misma para ambos. El primer evento es la salida de un rayo de luz de una fuente (A), el segundo la llegada del rayo a un receptor (B) tras reflejarse en un espejo (C). Aquí se utilizaría un aparato que supondremos en reposo, digamos, con respecto a O' .



A O le tiene sin cuidado O' ; él ve lo siguiente: al primer evento corresponden cuatro coordenadas (posición y tiempo) que son todas ellas

(menos dos) distintas de las cuatro del segundo evento. La trayectoria del rayo según O es como sigue:



⁹ Ver en "La teoría de la relatividad" (Alianza Universidad, p. 62).

¹⁰ Esta irreducibilidad no es una sorpresa: en muchas pelícu-

las de guerra moderna muestran a los valerosos pilotos norteamericanos defendiendo la civilización; a veces las bombas son filmadas en su caída desde el avión y otras desde tierra, ¿cuál es su verdadera trayectoria?, a según.

La tabla en que están montados la fuente y el receptor tiene longitud L y se mueve en dirección OX con velocidad V .

Si O mide un intervalo ΔT entre los dos eventos debe verificar que este intervalo es igual a la distancia que recorre el rayo, dividida por C . Esta distancia D está dada por:

$$D = 2\sqrt{(\Delta X/2)^2 + L^2} = \sqrt{(\Delta X)^2 + 4L^2}$$

En esta expresión $\Delta X = V\Delta T$ y L es la longitud de la tabla en reposo con respecto a O , (la tabla en reposo con respecto a O no es igual a la tabla en movimiento respecto a O porque el reposo es una cosa y el movimiento otra⁽¹⁰⁾, pero esta longitud, según lo supuesto, no varía). Por tanto

$$\Delta T = \frac{\sqrt{(V\Delta T)^2 + 4L^2}}{C}$$

de donde $\Delta T = \frac{2L/C}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}$

$$L' = L \text{ así que } \Delta T' = \frac{2L}{C}$$

De lo anterior resulta que $\Delta T = \frac{\Delta T'}{R}$

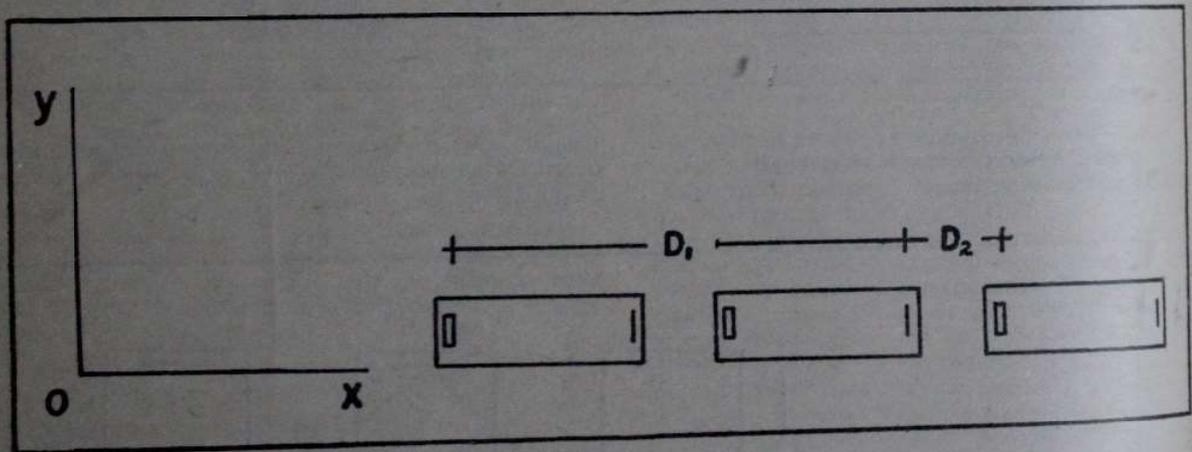
(donde $R = \sqrt{1 - V^2/C^2}$); como se ve los in-

Para O' el asunto es así:



tervalos difieren, porque ambos observadores son irreductibles el uno al otro).

A continuación, si por algún capricho O' coloca el aparato de tal forma que la fuente, el receptor y el espejo queden en el eje X se puede obtener una relación entre las longitudes que miden los dos observadores.



Para el observador O

$$\Delta T_1 = \frac{D_1}{C}, \quad D_1 = L + V\Delta T_1$$

$$\Delta T_2 = \frac{D_2}{C}, \quad D_2 = L - V\Delta T_2$$

De donde resulta que

$$\Delta T_1 = \frac{L}{C - V}, \quad \Delta T_2 = \frac{L}{C + V}$$

y finalmente

$$\Delta T = \frac{L}{C - V} + \frac{L}{C + V} = \frac{2L/C}{1 - V^2/C^2}$$

Este intervalo es distinto del que midió O cuando el aparato tenía orientación normal al movimiento y es de esperarse porque la longitud que tiene ahora la tabla para O no es igual a la longitud de la tabla en reposo respecto a O .

10. Una cosa es una cosa y otra cosa es otra cosa.

Para O' nada ha cambiado, o no mucho, y

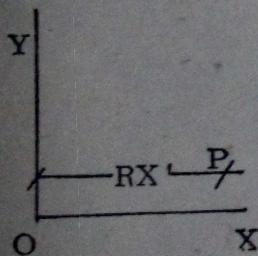
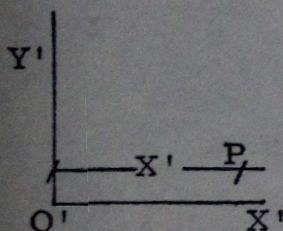
$$\Delta T' = \frac{2L'}{C};$$

como $\Delta T = \frac{\Delta T'}{R}$ se obtendrá $L = RL'$.

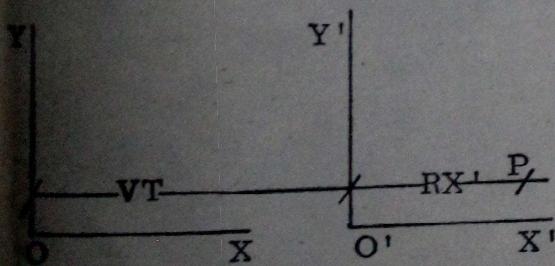
Si se comparan las mediciones de O con las que haría con el aparato quieto en su sistema, se llega a las mismas ecuaciones. Así pues, los tiempos y las longitudes ya no son propiedad de las cosas, la tabla ya no tiene una longitud verdadera. Y como la tabla es el producto, entre otras cosas, de estos procesos, tampoco existe la tabla.

Los tiempos y las longitudes ya no existen en un mundo externo donde son medidos por los hombres por medio de sus sentidos; son más bien relaciones que se determinan en situaciones particulares cuyos elementos, según lo dicho, son productos de tales situaciones.

En base a estas dos relaciones para los intervalos de tiempo y las longitudes medidas por los dos observadores, se pueden deducir las ecuaciones que expresan las coordenadas de un evento medidas por un observador en términos de las halladas por el otro, que se conocen con el nombre de transformaciones de Lorentz.



EN $T = T' = 0$



EN UN INSTANTE T (MEDIDO POR O)

Si $T = T' = 0$ cuando O y O' tienen la misma posición, la abscisa X de P medida por O en un instante T se puede relacionar con la medida por O' (X') así: lo que para O' mide X' , para O mide RX' . Por tanto, él puede escribir

$$X = VT + RX' \rightarrow X' = \frac{X - VT}{R}$$

Además, según lo supuesto, $Y' = Y$

$$Z' = Z$$

Una ecuación que exprese T' en términos de las coordenadas de O se puede obtener comparando las mediciones de ambos para un frente de onda luminosa que coincidía con O y O' cuando estos (claro) coincidieron, cuando este frente choca, digamos, con otro frente. O mide (X, Y, Z, T) y O' mide (X', Y', Z', T') .

Para O se cumple

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = C^2T^2 \text{ y para } O'$$

$$X'^2 + Y'^2 + Z'^2 = C^2T'^2$$

$$\text{Por tanto } X^2 - C^2T^2 = X'^2 - C^2T'^2.$$

Si en estas ecuaciones se reemplaza X' en términos de X y T se obtiene:

$$T' = \frac{T - VX/C^2}{R}$$

De esta ecuación se puede observar que, como señaló Einstein en su primer trabajo al respecto, dos eventos simultáneos para O que no ocurren en un mismo plano perpendicular al eje X , no serán simultáneos para O' , pues O mediría coordenadas (X_1, T) y (X_2, T) con lo que O' mediría dos tiempos distintos; de nuevo, los observadores son irreductibles, no hay ni un Espacio ni un Tiempo en el cual estén inmersos ambos.

Por derivación se puede encontrar la transformación para las velocidades en el eje X .

$$Vx' = \frac{Vx - V}{1 - (V/C^2)Vx}$$

Esta ecuación debe ser compatible con el principio de la relatividad en la constancia de la velocidad de la luz. Si $Vx = C$, entonces

$$Vx' = \frac{C - V}{1 - V/C} = C$$

$$\text{Si } Vx = -C, \quad Vx' = \frac{-C - V}{1 + V/C} = -C$$