

Todo tiene su momento y cada cosa su tiempo bajo el cielo. Su tiempo el lanzar piedras y su tiempo el recogerlas; su tiempo el abrazarse y su tiempo el separarse.

Nada es más evidente que el paso del tiempo y nada es más fácil que perder el tiempo. Todos sabemos lo que es el tiempo y nadie sabe definirlo. Cada segundo que pasa somos un segundo más viejos. Cuando me canso al jugar con mis nietos, entiendo mejor lo que es un proceso irreversible.

Afirmaciones como las anteriores y muchas otras más, nos hacen ver que, de una manera o de otra, el tiempo está presente en nuestro lenguaje, nuestras ideas y nuestras emociones.

El tiempo nos interesa a todos, pero algunas personas tienen interés profesional en estudiarlo. El tiempo interesa a los geólogos, a los astrónomos, a los biólogos, a los fisiólogos, a los meteorólogos, a los psicólogos, a los deportistas y a los físicos, entre otros. Cada quien ve al tiempo de diferente manera, con diferentes enfoques y con diversos propósitos.

Como yo no soy más que un físico, y bastante ignorante además, diré algo sobre el tiempo en la física. Se puede decir mucho sobre el tiempo en la física, desde la construcción de relojes, que tiene muchísimo de física y muchísimo de ingenio, hasta el principio de indeterminación de Heisenberg, pasando por el tema, tan sobado en los libros de divulgación, de la "flecha del tiempo" y el crecimiento de la entropía como medida de la irreversibilidad. Este último tema, me parece peligroso porque yo no sé, y creo que nadie sabe, qué diablos es la entropía en sistemas fuera de equilibrio, que son los más interesantes. Bueno, digamos algo.

1. En su librote *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Newton empieza por dar ocho definiciones y luego, antes de enunciar sus famosas leyes del movimiento, viene un extenso escolio.

Reflexiones a destiempo

JUAN MANUEL



La vie du rail. Spadern, Fix Masceai

En éste, dice que tiempo, espacio, lugar y movimiento son palabras conocidísimas por todos y añade que el vulgo sólo concibe esas cantidades a partir de su relación con las cosas sensibles, que de ello surgen prejuicios y que para removerlos es conveniente distinguir entre lo absoluto y lo relativo, lo verdadero y lo aparente, lo matemático y lo vulgar. Y después viene una caracterización del tiempo y del espacio.

El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí y por su propia naturaleza sin relación a nada externo, fluye uniformemente, y se denomina con otro nombre: *duración*. "El tiempo relativo, aparente y vulgar es alguna medida sensible y exterior de la duración, usada por el vulgo en lugar del tiempo verdadero; hora, día, mes y año, son medidas semejantes".

El párrafo anterior es interesante y comentable en todas sus partes, pero me interesa aquí destacar dos partes. Uno es el que dice que el tiempo absoluto fluye uniformemente y el otro es el que afirma que no tiene relación a nada externo. Con referencia a que el tiempo fluye uniformemente, me parece que eso es lo que permite a Newton considerar al tiempo como una variable continua y emplear sus ideas del cálculo diferencial e integral para plantear y resolver problemas de mecánica. Con respecto a que el tiempo fluye sin relación a nada externo, me da la impresión de que Newton piensa que ese tiempo no sólo es independiente de la materia y de sus propiedades, sino también es independiente del observador; esto es importante porque da sustento a la idea de que los intervalos de tiempo son iguales para todo observador.

Acerca del espacio, Newton dice cosas muy interesantes, pero sólo transcribo el comienzo de lo que dice.

El espacio absoluto, tomado en su naturaleza, sin relación a nada externo, permanece siempre similar e inmóvil.

El espacio relativo es alguna dimensión o medida móvil del anterior, que nuestros sentidos determinan por su posición con respecto a los cuerpos.

Más adelante, Newton añade que las partes del espacio no pueden verse o distinguirse unas de otras mediante nuestros sentidos. Por las posiciones de las cosas respecto a cualquier cuerpo, definimos los lugares y calculamos los movimientos tomando como referencia esos lugares. Por lo cual usamos lugares y movimientos relativos en vez de absolutos, sin inconveniente alguno, en los asuntos comunes. Puede suceder que no haya cuerpo realmente en reposo, al cual referir los lugares y movimientos.

Ojo. Newton está dispuesto a emplear el espacio relativo porque no le queda de otra y no encuentra ningún inconveniente en ello, pero con respecto al tiempo, se muestra inflexible, el tiempo es absoluto y ya. Además el espacio y el tiempo son entidades básicas pero fundamentalmente diferentes.

En esto Newton no difería de Aristóteles. Para ambos, la medición de un intervalo de tiempo da el mismo resultado para todo observador. El espacio y el tiempo están separados y son independientes entre sí. Las cosas se mueven en el espacio en el curso del tiempo y se puede decir cómo cambia su posición con el paso del tiempo, esto es, se pueden definir cantidades cinemáticas como la velocidad.

La gran diferencia entre Aristóteles y Newton está en la dinámica, no en la cinemática.

Ahora bien, con el espacio relativo y el tiempo absoluto, se puede construir la mecánica. Y funciona muy bien. Sin embargo puede haber sorpresas.

2. Supongamos que tenemos un sistema físico que está formado por un conjunto de cuerpos en interacción, pero de tal manera que si un objeto influye en el comportamiento de alguno de esos cuerpos, el objeto en cuestión también forma parte del sistema.

Por ejemplo, si pensamos en un péndulo, el sistema está formado por la lenteja del péndulo, el soporte del que cuelga, el mecate que une al soporte con la lenteja y la Tierra, puesto que el péndulo tiene peso por su interacción con ella. Con muy buena aproximación, podemos pensar que el Sol, la Luna, la Nebulosa de Orión y el resto del universo influyen muy poco en nuestro sistema. Diremos que estamos observando un sistema aislado.

Ahora bien, si tenemos un sistema físico aislado y nos limitamos a hacer observaciones exclusivamente sobre el comportamiento del sistema, o sea que no se vale mirar para afuera, ¿qué hora es?, ¿qué día es hoy? ¿en dónde estamos?

Estas preguntas parecen una vacilada, pero no. Pensemos un poco. Los cuerpos que constituyen nuestro sistema aislado están en interacción, se influyen unos a otros, sufren cambios, pueden empujarse, jalarse, golpearse, romperse, pero sólo por sus acciones mutuas, no por culpa de objetos fuera del sistema, porque hemos dicho que nuestro sistema está aislado. Pero cualquier cosa que le pase, cómo sea su comportamiento o procesos que ocurran, siempre se hará de acuerdo con las leyes de la naturaleza que rigen los fenómenos que suceden en el sistema. Si suponemos que las leyes de la física son las mismas ahora que dentro de un rato, que también eran válidas ayer y serán válidas pasado mañana, que valen aquí y también allá y acullá, entonces la respuesta a las preguntas vaciladoras que hicimos antes, tendrá que ser: no podemos saber.

Sin embargo, del mero hecho de reconocer que no podemos contestar estas preguntas, se puede concluir que hay cosas muy importantes que sí sabemos: en nuestro sistema físico aislado, se conserva la energía y el ímpetu. Pero esto, ¿cómo lo podemos saber?

Veamos lo mismo pero de otro modo. Si mediante la observación exclu-

siva del comportamiento de un sistema aislado pudiéramos saber en dónde estamos, se debería a que dicho comportamiento sería diferente en un lugar o en otro, lo que implicaría que las leyes de la física serían unas en un sitio y otras en otro sitio. Análogamente si pudiéramos saber la hora en que se realiza un experimento nada más mirándolo, tendríamos que concluir que las leyes de la física son distintas a cada rato.

No, lo que pensamos es que las leyes de la física son invariantes frente a translaciones en el espacio y en el tiempo. En otras palabras, aceptamos la homogeneidad del espacio y del tiempo. La existencia de la astronomía es nuestra garantía. Lo que hacen los astrónomos es aplicar las leyes de la física, que hemos encontrado en esta pequeña región del universo en que vivimos a lo largo de unos pocos siglos, a estrellas y galaxias lejanísimas y las cosas salen bien, el trabajo de los astrónomos es coherente y sus resultados también.

¿Y qué diablos tiene que ver esto con el ímpetu y la energía?

Un poco de calma. Supongamos que tenemos una fuente luminosa en el punto A enfrente de un espejo. Además hay un mirón en el punto M como se indica en la figura 1. Hace aproximadamente 19 siglos, un alejandrino llamado Herón se preguntó ¿de todos los caminos que empiezan en A, tocan el espejo y luego llegan a M, cuál es el

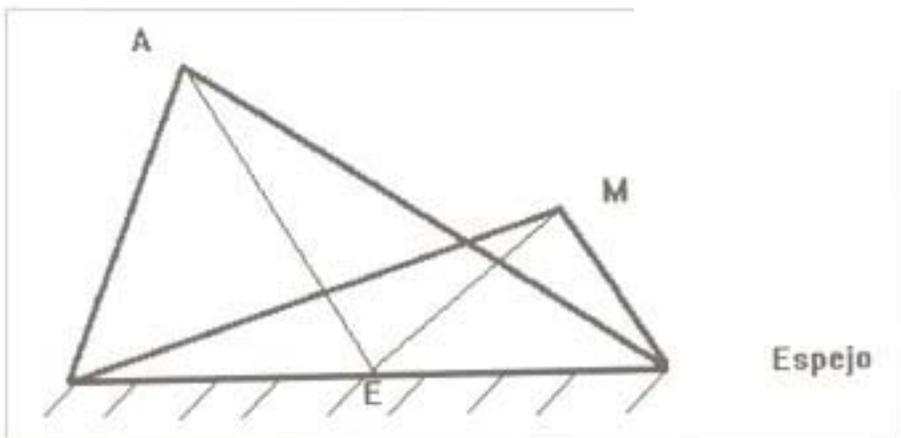


Figura 1. El problema de Herón.

de mínima longitud? Herón encontró la respuesta. El camino de mínima longitud, AEM, es el que cumple con la ley de la reflexión especular. En otros términos, la luz sigue, en el proceso de reflexión, el camino más corto posible.

Quince siglos después de Herón, el abogado francés Pierre Fermat, generalizó el resultado anterior de modo que fuera válido para la reflexión y la refracción de la luz. En el caso de la refracción es obvio que el camino óptico no es el de menor longitud, entonces Fermat exploró las consecuencias de postular que en todos los casos, el camino de la luz sea el de mínimo tiempo de recorrido. Figura 2.

El problema es ahora sí: de todos los caminos que empiezan en A y terminan en el ojo del mirón M, ¿cuál es el de menor tiempo de recorrido? La respuesta que encontró Fermat es que ese camino es el que de verdad recorre la luz, es el que cumple con la ley de la refracción.

El principio de Fermat del mínimo tiempo es un ejemplo de un principio de valor extremo que tiene como consecuencia una ley de la física.

Cien años más tarde, otro francés, Pierre de Maupertuis habló de otro principio de valor extremo que llamó "Principio de mínima acción". Sus argumentos eran rarísimos, más teológicos que físicos, pero salían cosas interesantes, de modo que otros físicos y

matemáticos como Leonhard Euler, Joseph Louis Lagrange y William Hamilton estudiaron lo que decía Maupertuis. El resultado es sumamente importante: a partir de un principio de valor extremo, que ahora conocemos como Principio de Hamilton, se pueden obtener las leyes del comportamiento de un sistema a partir del conocimiento de una función, llamada Lagrangiana, que lo caracteriza.

Los principios de valor extremo unifican la física, permiten tratar problemas diversos en la misma forma. Ahora sí, ya podemos relacionar el tiempo y la energía, el espacio y el ímpetu.

Hace 75 o 76 años, una extraordinaria matemática alemana, Emmy Noether, encontró un bello teorema que relaciona principios de invariabilidad con principios de conservación en sistemas que pueden estudiarse con principios de valor extremo. La idea es que, en un sistema físico que es gobernado por leyes que permanecen invariantes frente a cierta transformación, existe una cantidad física que se mantiene constante. El teorema de la señora Noether no solo dice que existe la cantidad que se conserva, también dice lo que hay que hacer para encontrarla.

Un caso particular es el de un sistema físico cuyo comportamiento es invariante frente a translaciones en el espacio; el ímpetu total es una constante. Esto significa que el principio de conservación del ímpetu proviene de la invariabilidad de las leyes de la física frente a translaciones espaciales. El ímpetu se conserva porque el espacio es homogéneo.

Otro caso particular del teorema de Noether es que en un sistema cuyas leyes son invariantes frente a translaciones en el tiempo, la energía se mantiene constante. Esto manifiesta que el principio de conservación de la energía proviene de la invariabilidad de las leyes de la física en el curso del tiempo. La energía se conserva porque el tiempo es homogéneo.

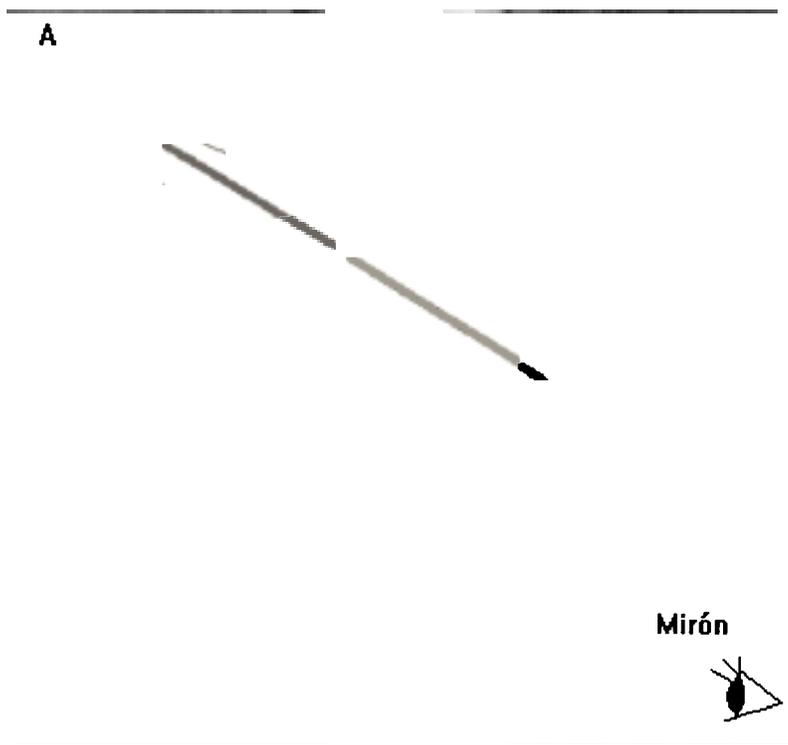


Figura 2.

Esto nos revela una relación básica entre el tiempo y la energía. El tiempo y la energía están profundamente vinculados.

3. Hay otro principio de invariancia de gran importancia. Es el principio de relatividad.

La primera ley de Newton, también llamada principio de inercia, no solo dice que los cuerpos tienen la propiedad de la inercia, sino también dice que existen sistemas de referencia inerciales.

Como todo mundo sabe, o debería saber, si un sistema de referencia se mueve a velocidad constante con respecto a un sistema inercial, él mismo es inercial.

Ahora viene el problema de cómo relacionar las coordenadas de un cuerpo en un sistema de referencia con las que tiene en otro sistema de referencia que se mueve a velocidad constante con respecto al primero. En la Figura 3, el sistema de referencia S' con ejes de coordenadas x', y', z' , se mueve a velocidad constante u a lo largo del eje x del sistema de referencia S cuyos ejes son x, y, z . Los respectivos ejes y, z los podemos

escoger de modo que sean paralelos.

Las coordenadas de un punto P son (x, y, z) en el sistema S, y (x', y', z') en el sistema S'. La separación entre los orígenes de los dos sistemas es:

$$OO' = ut$$

si empezamos a medir el tiempo a partir del instante en que los orígenes coincidieron.

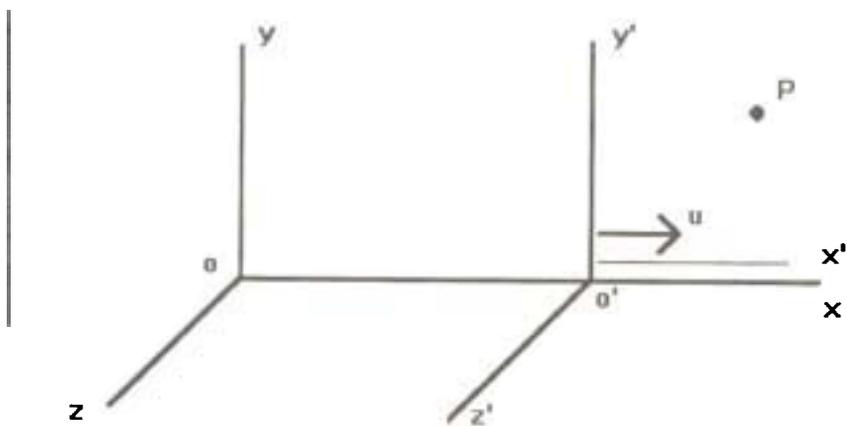


Figura 3.

Es claro que la relación entre las coordenadas del punto P en uno y otro sistema de referencia, es la siguiente:

$$\begin{aligned} x' &= x - ut \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}$$

Estas ecuaciones las complementamos con otra que sacamos de la idea de que el tiempo es absoluto: el tiempo transcurre igual para todos los observadores independientemente de dónde estén y de que se muevan uno respecto al otro. Esto significa que si t es el tiempo que mide un observador en el sistema S, y t' el que mide el observador en el sistema S', entonces

El conjunto de las cuatro ecuaciones anteriores se conoce como transformaciones de Galileo. Las tres primeras nos dicen que el espacio es relativo, y la cuarta dice que el tiempo es absoluto. Las coordenadas que nos dan la posición de un objeto dependen de la velocidad del observador; la medición del tiempo no se altera con la velocidad del observador que lo mide.

Pero ahora viene lo bueno. Si el cuerpo que ocupa el punto P se mueve, su velocidad tiene componentes V_x, V_y, V_z en el sistema S, y V'_x, V'_y, V'_z en el sistema S'. Es muy fácil ver (basta tomar derivadas respecto al tiempo de la transforma-

ción de Galileo), que la relación entre los componentes de la velocidad es

$$\begin{aligned} V_x' &= V_x - u \\ V_y' &= V_y \\ V_z' &= V_z \end{aligned}$$

Esta es la ley de transformación de velocidades galileana o clásica. Si escribimos la primera ecuación así:

$$V_x = V_x' + u$$

lo que dice es que la velocidad de un cuerpo respecto al sistema S es la suma de la velocidad de cuerpo respecto al sistema S' más la velocidad del sistema S' respecto al sistema S.

La ley de adición de velocidades de Galileo, consecuencia de que el espacio es relativo y el tiempo es absoluto, es que la velocidad de un cuerpo es relativa. ¡Mucho ojo! Todas las velocidades dependen de la velocidad del observador.

¿Y las aceleraciones? También es fácil ver (tomando nuevamente la derivada respecto al tiempo) que:

$$a' = a.$$

La aceleración es invariante frente a transformaciones de Galileo.

Si ahora pensamos en dos cuerpos en vez de uno, con coordenadas (x_1, y_1, z_1) y (x_2, y_2, z_2) , se sigue, de las transformaciones de Galileo y del teorema de Pitágoras que la distancia entre dos cuerpos, d_{21} , es tal que

$$\begin{aligned} d_{21}^2 &= (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + \\ & (z_2 - z_1)^2 = (x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + \\ & (z'_2 - z'_1)^2 = d_{21}'^2 \end{aligned}$$

Además es obvio que

$$t_2 - t_1 = t'_2 - t'_1$$

Lo que esto nos dice es que la distancia entre dos puntos y los intervalos de tiempo, son invariantes cada uno por su cuenta con respecto a las trans-

formaciones de Galileo. También las velocidades relativas son invariantes:

$$V_2 - V_1 = V'_2 - V'_1$$

Si ahora suponemos que la masa de un objeto es una propiedad del objeto independiente del estado de movimiento del que la observa y del movimiento del objeto, y además las fuerzas entre objetos dependen sólo de las posiciones y de las velocidades relativas entre ellos, entonces se obtiene un resultado importantísimo: la ley fundamental de la mecánica, que nos dice que en un sistema inercial

$$F = ma,$$

es invariante frente a transformaciones de Galileo. Este es el principio de relatividad de Galileo. Todos los sistemas de referencia inerciales son equivalentes en la mecánica.

Bella simetría, pero ¿por qué sólo de la mecánica? ¿por qué no decir que todas las leyes de la física son invariantes frente a cambios de sistema de referencia inercial?

Aquí hay una dificultad porque las leyes del electromagnetismo, firmemente establecidas por los trabajos que

culminan con Maxwell y que fueron confirmadas por Hertz, no son invariantes frente a transformaciones de Galileo. Esto lo hizo ver la luz, que es una radiación electromagnética.

El experimento fallido más famoso de la historia, lo realizaron un par de norteamericanos: A. Mitchelson y E. Morley, quienes encontraron que la luz no cumple con la ley de adición de velocidades de Galileo.

Como la velocidad de la luz es muy grandota, para poder detectar un cambio en su medida respecto a un sistema en movimiento, se requerían dos cosas: un sistema de referencia que se moviera con velocidad relativamente grande y un equipo de mucha precisión. El equipo lo construyó Mitchelson y el sistema de referencia es la propia Tierra, que en su viaje alrededor del Sol tiene una velocidad de aproximadamente 30 km/s. En la Figura 3 se indica lo que esperaban encontrar y lo que encontraron.

Si C es la velocidad de la luz y V_T es la velocidad de la Tierra, la ley de adición de velocidades de Galileo dice que la velocidad de la luz de una estrella a la que nos dirigimos es $C + V_T$, la velocidad de la luz de una estrella de la que nos alejamos es $C - V_T$ y la velocidad de la luz de una estrella que nos viene perpendicularmente a la dirección en que nos movemos, es C. Sólo que no es así. La velocidad de la luz es siempre C, independientemente de la velocidad del observador y de la velocidad de la fuente de luz.

La velocidad de la luz es una constante universal. La velocidad de la luz es absoluta, no relativa.

Pero habíamos quedado en que debido a que el espacio es relativo y el tiempo es absoluto, todas las velocidades son relativas; y ahora la luz nos sale con que eso no se aplica para ella. Ni modo, esto no tiene vuelta de hoja, está confirmadísimo experimentalmente, la velocidad de la luz es una constante absoluta.

Sólo hay una manera de salir del atolladero. El tiempo es relativo. Ahora

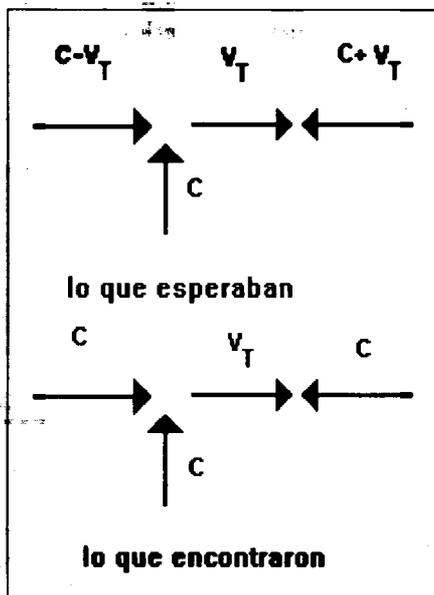


Figura 4.

lo que hay que hacer es encontrar una transformación del espacio y del tiempo distinta a la de Galileo, que tenga como consecuencia que la velocidad de la luz es la misma para todos los sistemas de referencia independientemente de su velocidad relativa.

Hagamos las siguientes observaciones:

1. Si A y B son dos cuerpos en movimiento relativo, la velocidad de A respecto a B es la negativa de la velocidad de B respecto a A.

2. Si A y B están en reposo relativo, la velocidad de otro cuerpo, C, respecto a A, es la misma que respecto a B.

3. Cualquiera que sea la velocidad de B respecto a A, si C se mueve respecto a A con la velocidad de la luz, tiene la misma velocidad respecto a B.

A partir de esto, con un poquito de matemáticas, sale lo siguiente:

Si u es la velocidad de B respecto a A, V es la velocidad de C respecto a B y W es la velocidad de C respecto a A, entonces

$$W = \frac{u + V}{1 + \frac{uv}{c^2}}$$

donde C es la velocidad de la luz.

Esta es la ley de adición de velocidades relativista, que sustituye a la de Galileo, pero que se reduce a ésta si u y V son chicas comparadas con la velocidad de la luz.

De aquí se puede obtener la transformación que liga coordenadas y tiempos de un sistema de referencia con los de otro sistema que se mueve con velocidad u respecto a él.

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{t - \frac{ux}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \end{aligned}$$



Albert Einstein con Paul Ehrenfest

Estas ecuaciones se llaman transformaciones de Lorentz porque el físico holandés H.A. Lorentz fue uno de los primeros en encontrarlas y estudiarlas.

Basta ver las ecuaciones anteriores para darse cuenta que si la velocidad u , es pequeña en comparación con la velocidad de la luz, las transformaciones de Lorentz se reducen a las de Galileo.

Las transformaciones de Lorentz son más simétricas y profundas que las de Galileo. Acaban con la separación tajante entre el espacio y el tiempo. Las transformaciones de Lorentz combinan espacio y tiempo tanto en la transformación del espacio como del tiempo. Ya no hay dos invariantes separados, la distancia entre puntos del espacio por una parte y los intervalos de tiempo por otra, sino que ahora hay un solo invariante que, es fácil verlo, es

$$\begin{aligned} (x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2 - \\ c^2 (t'_2 - t'_1)^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + \\ (z_2 - z_1)^2 - c^2 (t_2 - t_1)^2. \end{aligned}$$

De aquí se sigue que en vez de hablar de espacio y tiempo, debemos hablar de un espacio-tiempo. El espacio y el tiempo están enlazados.

En 1905, un joven aficionado a tocar el violín dijo que el espacio-tiempo es homogéneo, que las leyes de la naturaleza son invariantes frente a cambios de sistema de referencia inerciales y que la velocidad de la luz es una constante universal absoluta.

A partir de estas afirmaciones el joven violinista sacó conclusiones sorprendentes, como que las longitudes, los intervalos de tiempo y el concepto de simultaneidad son relativos, que la masa y la energía son equivalentes. Además tuvo que reconstruir la mecánica, porque esta era invariante frente a transformaciones de Galileo, pero no frente a las de Lorentz.

Casi se me olvidaba decir el nombre del joven violinista. Se llamaba Albert Einstein. ●

Juan Manuel Lozano: Instituto de Física, UNAM.