

Fenómenos relativistas explicados con modelos espaciotemporales

Juan Tomé / Amonaria cosmológica

www.cosmologica.amonaria.com / Menú / Científica / Relatividad



1 Elementos básicos de las representaciones minkowskianas

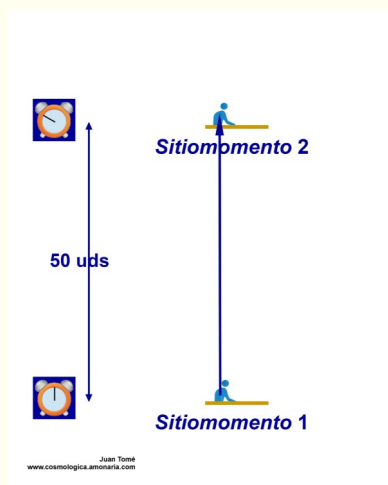


Figura 1

Un punto del espacio es un sitio, un lugar. Un punto del tiempo es un momento. Un punto del espaciotiempo es un *sitiomomento*, palabra que transmite la idea de que, de acuerdo con el mensaje esencial de la Teoría de la Relatividad (TR), espacio y tiempo están inextricablemente, inseparablemente tejidos en el espaciotiempo.

Las líneas de universo conectan sitiomomentos del espaciotiempo y describen evoluciones, procesos físicos. Son representaciones de los cambios causalmente concatenados que llevan de un sitiomomento a otro.

Minkowski [1], en 1908, en la conferencia de Colonia donde presentó su concepción del espaciotiempo, definió el «tiempo propio» como cantidad puramente geométrica: la longitud cuadridimensional de una línea de universo.

Eddington [2], en 1920, dio significado físico a las longitudes de líneas de universo, al «tiempo propio» definido por Minkowski:

“Hay una interpretación física del intervalo-longitud a lo largo de la trayectoria [de universo] de una partícula que ayuda a dar una idea más tangible de su significado. Es el tiempo percibido por un observador, o medido por un reloj transportado por la partícula. Se llama tiempo propio; [...]”

y ese significado ha permanecido en textos académicos y de divulgación hasta la actualidad.

De modo que los relojes miden (en unidades temporales, 50 uds en la figura 1) longitudes de las líneas de universo que trazan en el espaciotiempo. En cuanto que esas líneas son representaciones de procesos físicos, su longitud espaciotemporal se corresponde con la duración del proceso representado. Por eso se puede decir que los relojes miden duraciones de procesos.

2 La “dilatación temporal”

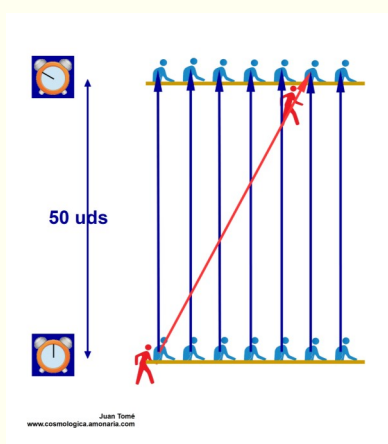


Figura 2

Las personas que atienden, sentadas, una ponencia cualquiera tienen líneas de universo paralelas (figura 2, líneas azules). Son procesos que mantienen las separaciones espaciotemporales. Las colecciones de procesos paralelos se perciben como objetos en reposo relativo.

Pero si otra persona se mueve entre las que están sentadas, su línea de universo (figura 2, línea roja) será oblicua a las de ellas y no se mantendrán las separaciones espaciotemporales. Esto se percibirá como movimiento relativo.

Cabe preguntarse cuál será la longitud de la línea de universo roja. Es decir (figura 3), cuántas unidades temporales contará un cronómetro que lleve encima la persona que anda entre los sitiomomentos inicial y final de su proceso. Para facilitar la

comparación con lo que marca el cronómetro azul de cualquiera de las personas sentadas, supondremos que ambos cronómetros se pusieron en marcha a la vez cuando coincidieron en el espaciotiempo la persona que anda y la sentada en la última fila.

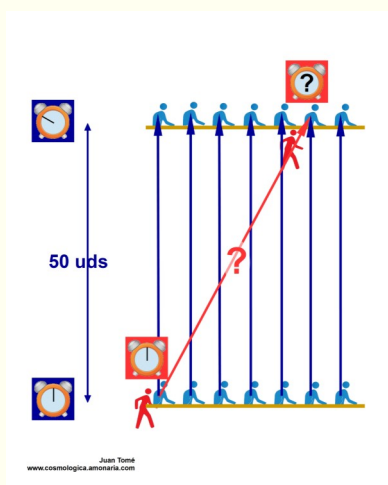


Figura 3

La Teoría de la Relatividad Especial (TRE) establece con claridad cuánto marcará al final el cronómetro rojo. Pero no hace falta conocer la TRE para poder afirmar que no marcará 50 uds, porque la longitud de la línea de universo de la persona sentada en la última fila (azul) no tiene por qué ser igual a la de la línea de universo de la persona que anda (roja), puesto que conectan sitiomomentos diferentes.

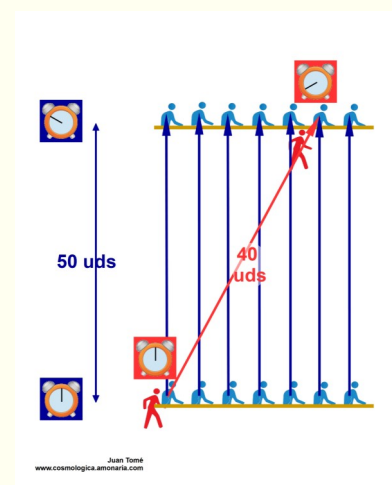


Figura 4

Lo que podría comprobarse experimentalmente es que a la velocidad normal de una persona andando, el cronómetro rojo marcaría casi exactamente 50 uds. Pero en la hipótesis de una superpersona que caminará a $0,6c$, el cronómetro rojo marcaría 40 uds.

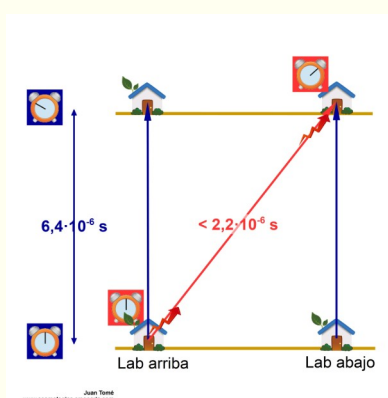


Figura 5

Es el fenómeno que se conoce habitualmente como “dilatación temporal”, que se resume a menudo diciendo que “los relojes en movimiento atrasan”, y cuya prueba experimental más conocida y directa (figura 5) es el de detección de muones procedentes de rayos cósmicos en dos laboratorios situados a distintas alturas sobre el nivel del mar.¹

La longitud de las líneas de universo (azules) de los laboratorios de arriba y de abajo entre los sitiomomentos que corresponden a la detección de un muón en el laboratorio de arriba y su detección en el de abajo es $6,4 \cdot 10^{-6} \text{ s}$. La longitud de la línea de universo (roja) de un muón detectado es menor de $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ porque esa es la vida media del muón, y si ha conseguido conectar los sitiomomentos “detección de muón cósmico en el laboratorio de arriba” y

“detección de muón cósmico en el laboratorio de abajo” es porque la separación espaciotemporal entre esos dos sitiomomentos es menor que la vida media del muón: los muones no pueden cubrir una separación espaciotemporal más larga que su vida.

3 La utilidad didáctica del Sistema de Referencia de Simetría (SRS)

Las representaciones de las figuras 4 y 5 tienen un hándicap notable: hacer aparecer las líneas de universo rojas como más largas que las azules, siendo más cortas que ellas en la realidad espaciotemporal. Es un problema intrínseco de la representación: el dibujo es, ineludiblemente, euclídeo pero representa espaciotiempo, cuya geometría es pseudoeuclídea.

Hay una solución: recurrir a representaciones en el Sistema de Referencia de Simetría (SRS) de los dos procesos que se estudian. En este SR ([6] y [7]), la representación refleja fielmente sobre el papel las relaciones cuantitativas entre magnitudes espaciotemporales referidas a los dos procesos estudiados. Como, dados dos procesos rectilíneos cualesquiera siempre habrá otro para el que los

¹ Los datos numéricos de la figura 5 se refieren al experimento pionero de Rossi y Hall, de 1941, y están tomados de Smith [3]. La interpretación del fenómeno en términos de relojes que mantienen sus ritmos y miden duraciones de procesos está detallada en [4] y [5].

dos procesos dados serán simétricos, la posibilidad de recurrir al SRS para la explicación de fenómenos TRE existe en todo caso.

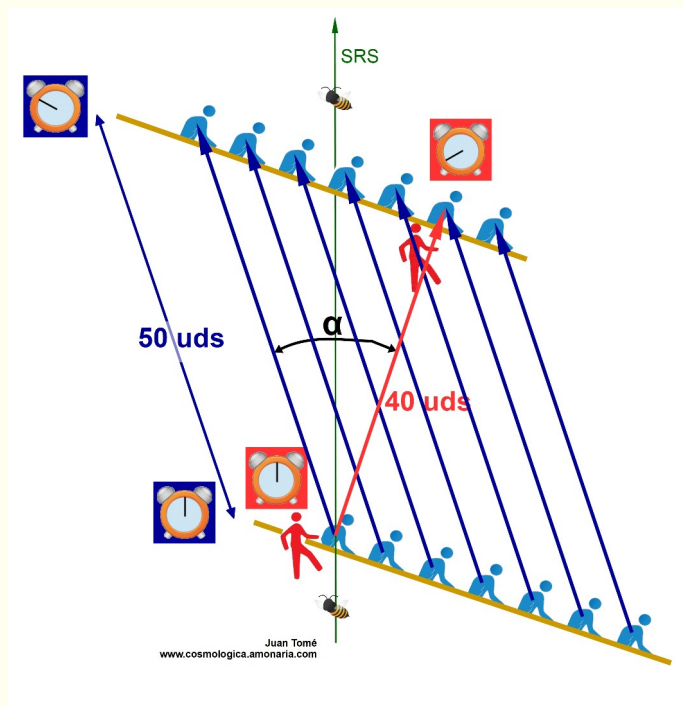


Figura 6

separaciones espaciotemporales entre los sitiomomentos iniciales y finales respectivos. El reloj azul y el rojo marchan al mismo ritmo (por eso son buenos relojes, buenos aparatos de medir) y miden correctamente: el azul una distancia espaciotemporal (mayor) y el rojo otra (menor).

La figura 6 es el diagrama minkowskiano en el SRS de las personas sentadas y la superpersona capaz de caminar a 0,6c.

Se ha trazado atendiendo a una propiedad general de estas representaciones [5]: el ángulo α que forman dos procesos en su SRS es tal que:

$$\sin \alpha = v/c$$

En este caso, $\alpha = 36,87^\circ$, porque

$$\sin (36,87^\circ) = 0,6$$

Sobre la figura trazada con ese ángulo entre procesos simétricos, pueden medirse los segmentos que representan las líneas de universo de las personas sentadas y de la supercaminante, y comprobar que están en la proporción 5/4 de las separaciones espaciotemporales que representan.

Queda así más claro que el reloj azul mide 50 uds y el rojo 40 uds, porque esas son las

separaciones espaciotemporales entre los sitiomomentos iniciales y finales respectivos. El reloj azul y el rojo marchan al mismo ritmo (por eso son buenos relojes, buenos aparatos de medir) y miden correctamente: el azul una distancia espaciotemporal (mayor) y el rojo otra (menor).

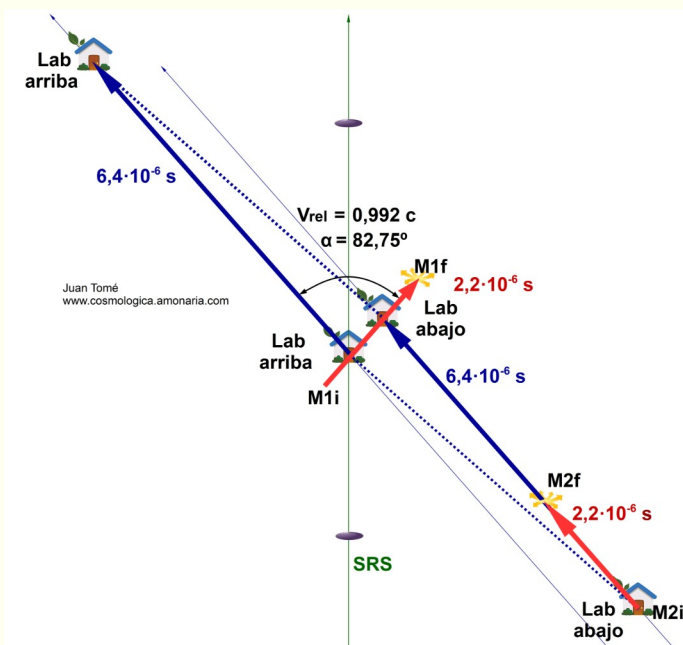


Figura 7

proceso muón, esto es, su vida media. Esta es la sencilla razón por la que los muones cósmicos pueden conectar esos sitiomomentos, razón que no necesita recurrir dilatación de la vida media de los muones. La vida media del muon es la duración propia del “proceso muon”, y es absoluta, independiente de movimientos relativos.

También hace la figura evidente que un muón en reposo en el laboratorio de abajo (o en el de arriba), esto es, un muón paralelo a la línea de universo del laboratorio, no puede conectar los sitiomomentos “emisión de un muón en reposo en el laboratorio de abajo cuando se detecta un

La figura 7 es el diagrama minkowskiano para el experimento real de los muones procedentes de rayos cósmicos, en el SRS de muones y laboratorios.

La velocidad relativa de muones y laboratorios es ahora de 0,9992c, lo que corresponde a un ángulo de 82,75° entre sus líneas de universo.

De nuevo, la figura representa fielmente las distancias espaciotemporales referidas a muones y laboratorios, haciendo evidente que la separación espaciotemporal entre los sitiomomentos “detección de muón cósmico en el laboratorio de arriba” y “detección de muón cósmico en el laboratorio de abajo” es menor (casi una tercera parte) que la duración media (longitud espaciotemporal media) del

muón cósmico en el de arriba” y “detección del muón cósmico en el laboratorio de abajo”, simplemente porque la separación espaciotemporal entre esos dos sitios momentos es mucho mayor que la vida media del muón.

Referencias

- [1] Eddington, Arthur, 1920, Space, time and gravitation, Harper and Row, New York and Evaston, 1959, p 71.
- [2] Minkowski, Hermann, 1908, Space and time. En Space and Time. Minkowski's Papers on Relativity, Minkowski Institute Press (free version), 2012, p47.
- [3] Smith, J., 1965, Introducción a la relatividad especial (Reverté, Barcelona 1969), pp 54-57.
- [4] Tomé, J., “Relatividad Especial: una interpretación del fenómeno de la dilatación temporal”, Revista Española de Física, 35- 2 (2021), pp 7-11.
- [5] Tomé, J., “Problemas de Relatividad especial: el potencial didáctico del Universo de procesos y del Sistema de Referencia de Simetría”, Revista Española de Física, 38-2 (2024) pp 24-29.
- [6] Tomé, J., “Adelantamiento de trenes en el espaciotiempo”, Revista Española de Física, 36-4 (2022), pp 10-15.
- [7] Tomé, J., “Efecto Doppler, composición de velocidades y transformación de coordenadas en la TRE: un enfoque geométrico”, Revista Española de Física, próxima publicación.