

La paradoja de la kizomba

Juan Tomé

Amonaria cosmológica / Científica / Relatividad
www.cosmologica.amonaria.com



1 Introducción

Con motivo de la celebración de las decimoséptimas jornadas DDD (Divulgar Divirtiendo Desinteresadamente), en el Salón de Baile del Círculo de Bellas Artes de Madrid, y justo antes de comenzar las ponencias en el teatro adyacente, mi pareja, Cruz Ibarra, y yo, bailamos una kizomba cuya duración exacta es 4 minutos.

La kizomba es un baile originario de Angola que se extendió por territorios de lengua portuguesa y que ahora tiene Brasil como foco más importante. En su forma actual es un baile muy mecido, muy dulce, que mezcla elementos latinos y tangueros. La canción que bailamos fue “Mil pasos”, de Soha, una composición muy cuidada que tiene una melodía que avanza como a latidos, cantada por una voz cautivadora, y una base rítmica en la que pueden reconocerse elementos de la música mecánica similares a los de las cajitas de música. La elegimos porque sus arreglos rítmicos evocan los golpes de los metrónomos y los tictacs de relojes, y porque su duración, 4 minutos, es la duración máxima que deben respetar las ponencias DDD. La elegimos porque “Mil pasos” es un perfecto reloj para las DDD.

Todo reloj es un proceso patrón, un proceso reproducible y de duración controlada. Los relojes se usan para medir duraciones de procesos de duraciones indefinidas (o indomables), caso de las ponencias de cualquier tipo. Uno de los usos de los más primitivos relojes de factura humana, las clepsidras, era controlar la duración de los discursos, en el senado romano por ejemplo, para que el uso de la palabra estuviera equitativamente repartido. A cada intervención correspondía un número concreto de clepsidras, y si el orador necesitaba más, quedaba a criterio de quien presidiera la sesión concederlas o no. Las clepsidras servían para ese fin porque su vaciado siempre duraba lo mismo. *Bailar Mil pasos* es un reloj porque su duración es siempre la misma. Y es un reloj DDD porque dura 4 minutos. Para controlar la duración de las ponencias DDD con el reloj *bailar Mil pasos*, bastaría que los ponentes comenzaran su exposición al inicio del baile y quedaran obligados a terminar antes (o como máximo a la vez) de que el baile terminara.

Aunque *bailar Mil pasos* es un reloj como otro cualquiera, tiene una ventaja sobre los relojes habituales: permite resaltar que lo que lo define a un reloj es ser un proceso de duración controlada. Todos los relojes se basan en procesos de duración controlada (vaivenes de péndulos colgados o de torsión, oscilaciones piezoeléctricas o transiciones finas del electrón más externo del Cs¹³¹) pero ese hecho queda tanto más oculto cuanto más sofisticado es el reloj, lo que favorece la creencia de que «los relojes miden el tiempo», afirmación muy ambigua, muy imprecisa y que está en el origen de muchas confusiones. Los relojes son procesos, así que medir con ellos no puede ser sino comparar procesos con el fin de cuantificar una propiedad física del proceso medido, su duración, algo muy concreto, muy distinto del tiempo abstracto.

Esa ventaja del reloj *bailar Mil pasos* lo hace muy apropiado para explicar la paradoja de los gemelos en un lenguaje libre de la palabra «tiempo», libre por tanto de argumentos referidos a «tiempos que pasan más deprisa o más despacio» o a «relojes que atrasan o adelantan».

2 La formulación de la paradoja de la kizomba

Consideremos tres parejas de baile que han preparado concienzudamente una coreografía para “Mil pasos”, constatando hasta la saciedad que sus movimientos van perfectamente a la par y perfectamente ajustados a la música.

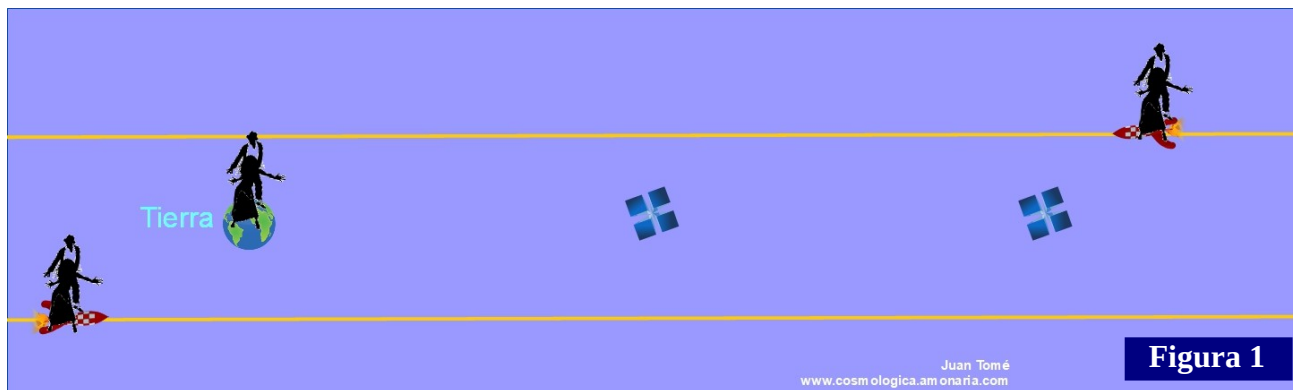


Figura 1

Como se muestra en la figura 1, una pareja se dispone a bailar en la Tierra; otra en un cohete que se mueve hacia la derecha y la tercera en un cohete que se mueve hacia la izquierda. Los dos cohetes se mueven con velocidad constante, la misma para ambos respecto de la Tierra.

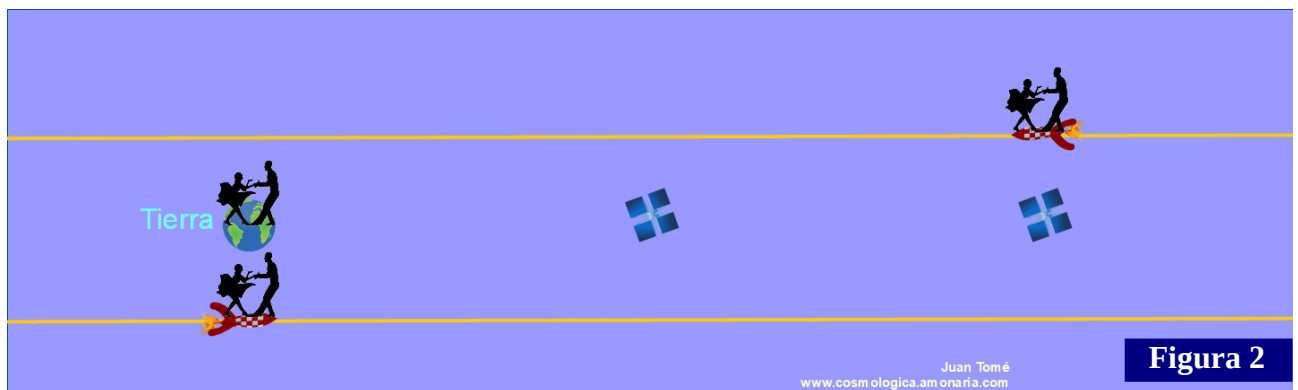


Figura 2

Cuando el cohete de abajo en la figura 2 pasa junto a la Tierra y el otro pasa junto a la estación espacial de la derecha, las tres parejas inician el baile.

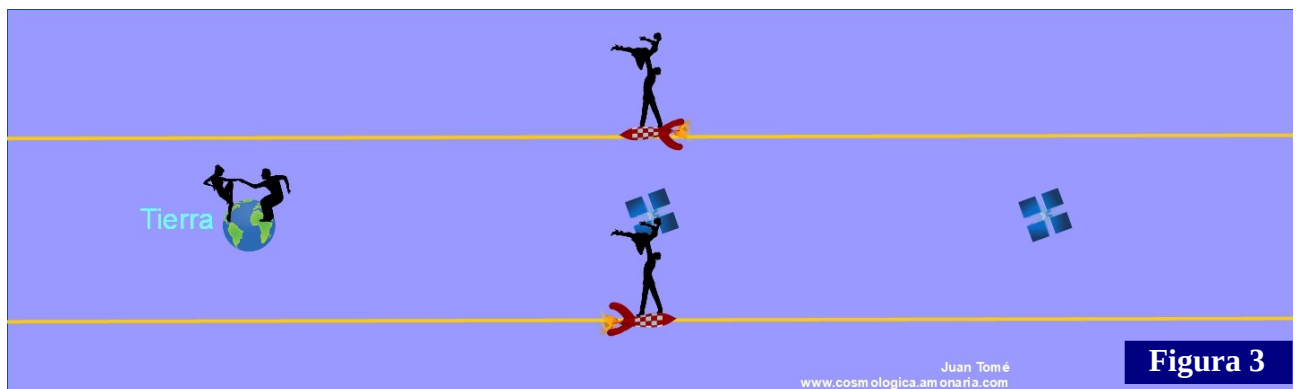


Figura 3

Cuando los cohetes se cruzan en la estación espacial que está a medio camino de la Tierra y la otra estación (figura 3), se constatará que las parejas de los cohetes van ligeramente retrasadas: están haciendo un porté del que la pareja de la Tierra está haciendo ya la flexión que sigue a la caída.

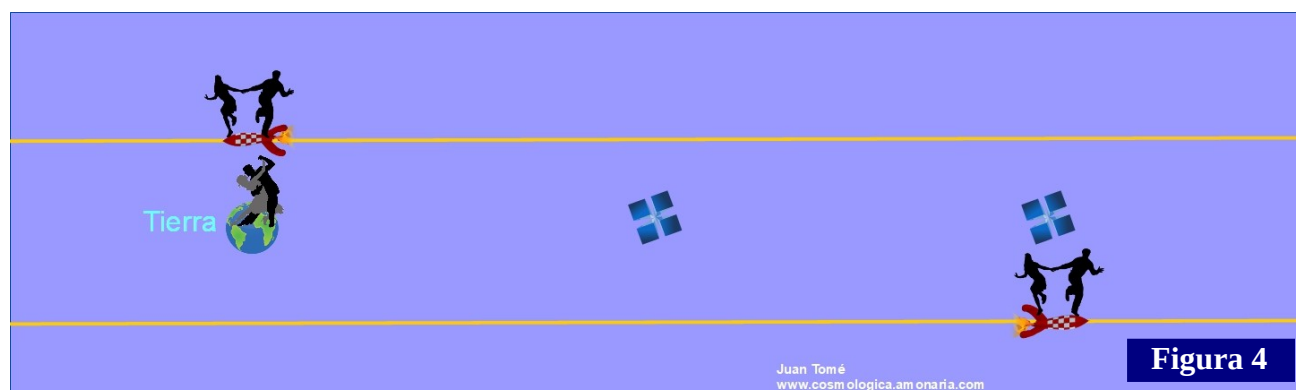
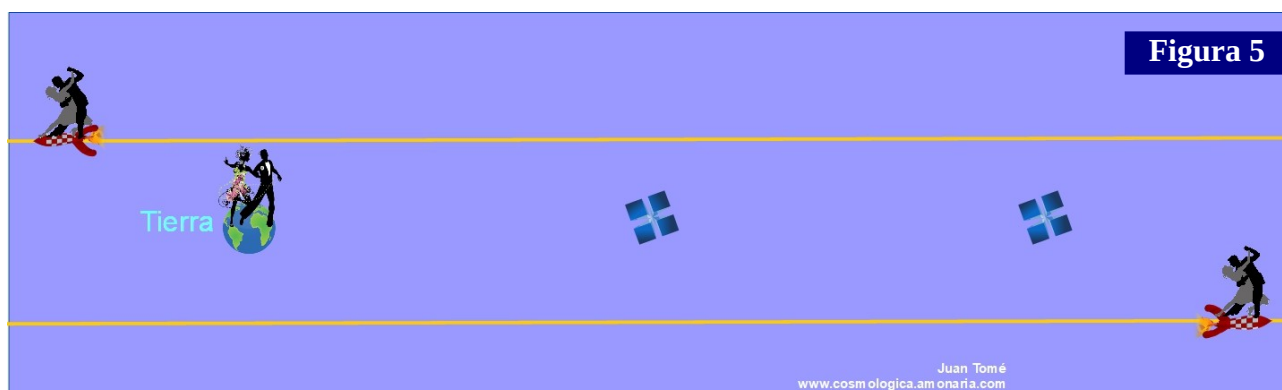


Figura 4

Cuando el cohete de arriba en la figura 4 pasa junto a la Tierra y el otro pasa junto a la estación espacial de la derecha, se constatará que la pareja de la Tierra marca la pose final, mientras que las dos parejas de los cohetes todavía la están preparando.

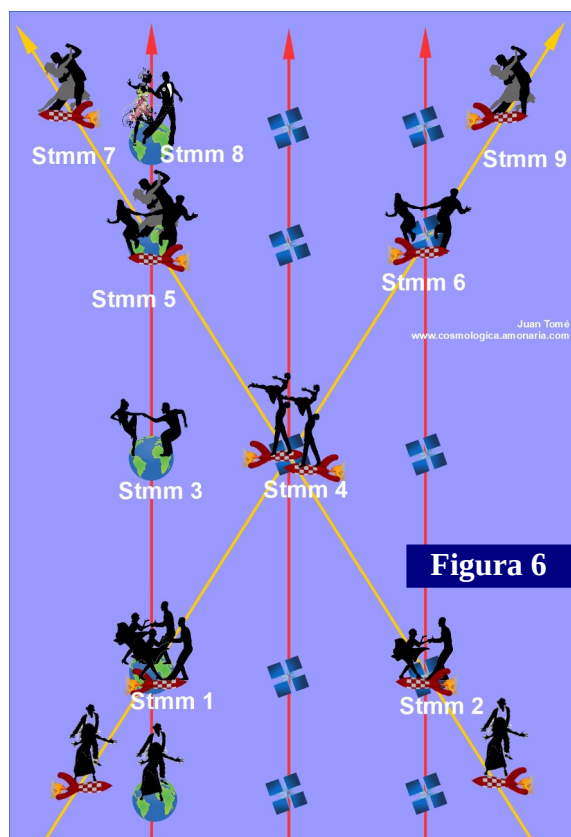


Habría que esperar un poco, figura 5, para que las parejas de los cohetes marcaran la pose final. Para entonces, la pareja de la Tierra ya la habría roto, habría saludado y estaría saliendo de escena.

Aunque nunca se ha realizado la experiencia descrita, existen pruebas experimentales suficientes para tener la seguridad de que eso es lo que sucedería si se realizara. La pregunta pertinente es: ¿Cómo se explica que dos bailes iguales que empiezan a la vez no terminen a la vez?

3 La explicación de la paradoja de la kizomba

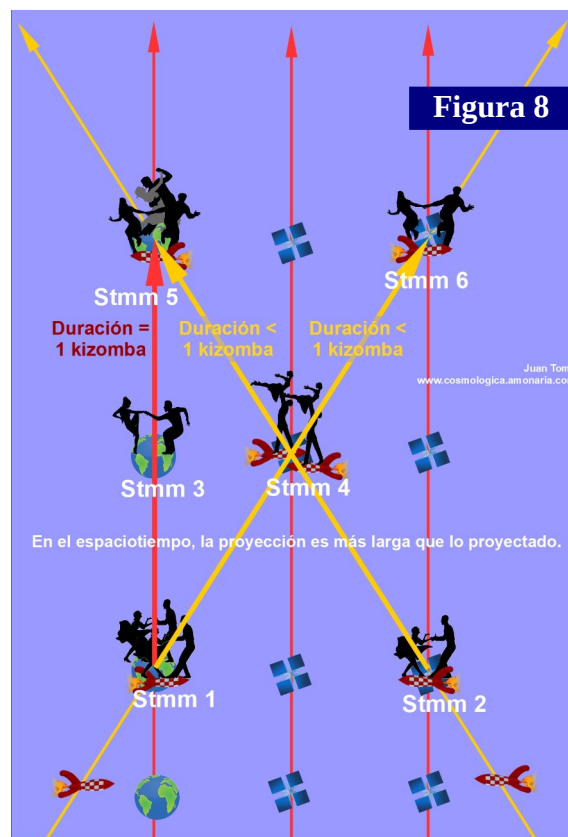
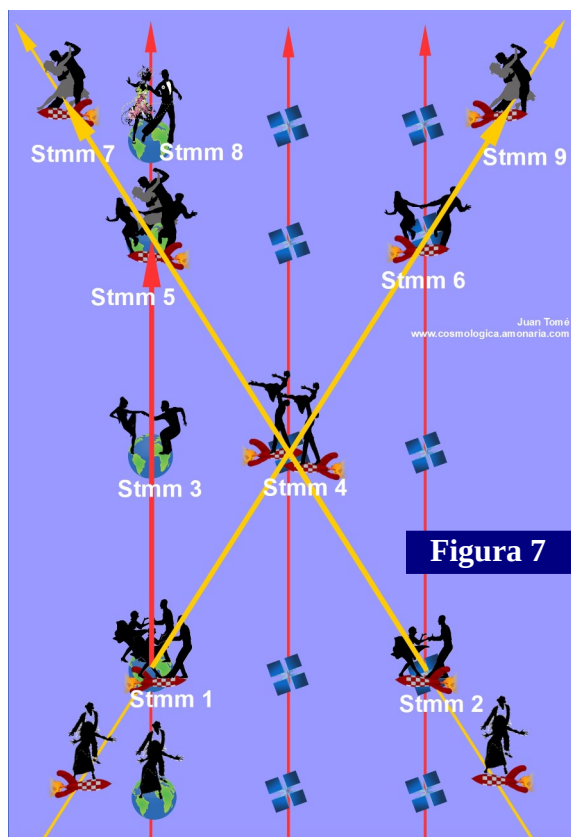
Los hechos descritos no tienen explicación en la concepción clásica de la realidad, considerada como un conjunto de sistemas tridimensionales que cambian en un tiempo que pasa igual para todos: si pasan 4 minutos en la Tierra, tienen que haber pasado también 4 minutos en los cohetes. Pero la enseñanza fundamental de la Teoría de la Relatividad (TR) es que espacio y tiempo no son entidades independientes, sino que se encuentran íntimamente imbricadas en el espaciotiempo. En coherencia con eso, los fenómenos relativistas como la paradoja de la kizomba, no pueden explicarse en términos de objetos tridimensionales y de tiempo unidimensional que pasa, sino en términos de entidades cuatridimensionales: los procesos (Tomé, 2021, p 8).



Los procesos se desarrollan en el espaciotiempo según “caminos” que se llaman líneas de universo. Las tres líneas rojas verticales de la figura 6 corresponden a procesos que transcurren en la Tierra o en las estaciones espaciales. Son paralelas porque esos procesos se desarrollan en la misma dirección del espaciotiempo. Los que transcurren en los cohetes siguen las líneas naranjas de la figura, en direcciones espaciotemporales distintas entre sí y distintas a la de los procesos que se desarrollan en la Tierra y en las estaciones espaciales.

Las inclinaciones relativas de los procesos en el espaciotiempo suelen describirse como velocidades relativas. Los procesos paralelos (los que transcurren en la Tierra y en las estaciones espaciales) se perciben en reposo relativo. Los procesos de los cohetes, de direcciones inclinadas respecto a ellos, se perciben en movimiento relativo respecto a la Tierra, a las estaciones espaciales y entre sí. La inclinación hacia derecha o izquierda corresponde a movimiento hacia la derecha o hacia la izquierda respectivamente.

En el espaciotiempo, ni los sitios ni los momentos por separado son relevantes: lo significativo son los sitiomomentos. En la figura 6 aparecen numerados del 1 al 9 los que merecen atención: los que corresponden al comienzo de los bailes (números 1 y 2); el del medio del baile en la Tierra (número 3); los del cruce de los dos cohetes (4); el de final del baile en la Tierra (5) y el correspondiente del cohete (6); y los de final de baile en los cohetes (7, 9) y el correspondiente en la Tierra (8).



El proceso *bailar Mil pasos* (que es nuestro proceso patrón, nuestro reloj) es exactamente el mismo para las tres parejas de baile. Por lo tanto (figura 7), las distancias espaciotemporales Stmm1-Stmm5, Stmm1-Stmm9 y Stmm2-Stmm7 tienen que representar duraciones iguales: 4 minutos. Aunque la figura no refleje eso¹, la igual duración de los tres procesos es indiscutible, porque las tres parejas han bailado en sistemas de referencia inerciales (tanto la Tierra como los cohetes han mantenido sus velocidades mientras bailaban) así que no puede haber (de acuerdo con el Principio de Relatividad) razón alguna para que se altere en lo más mínimo la física del baile o de la música, razón alguna para que se alteren los ritmos, ni en la Tierra ni en los cohetes.

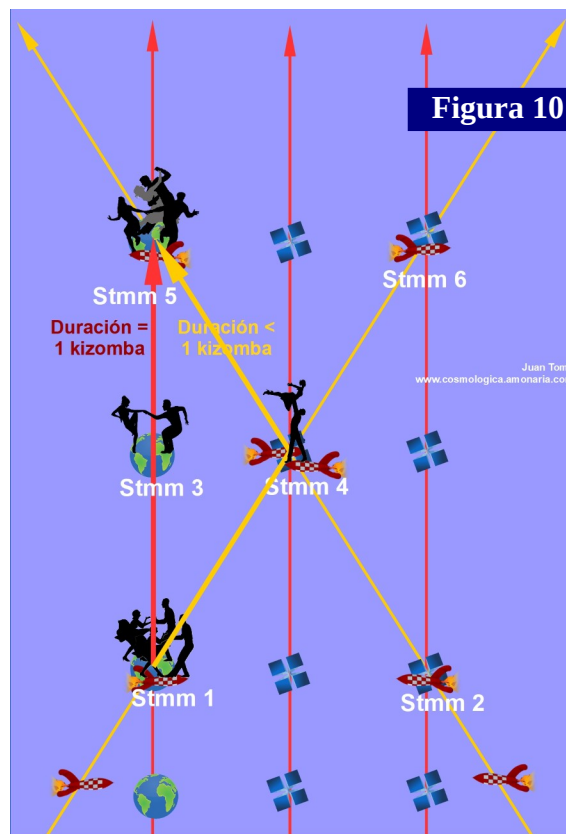
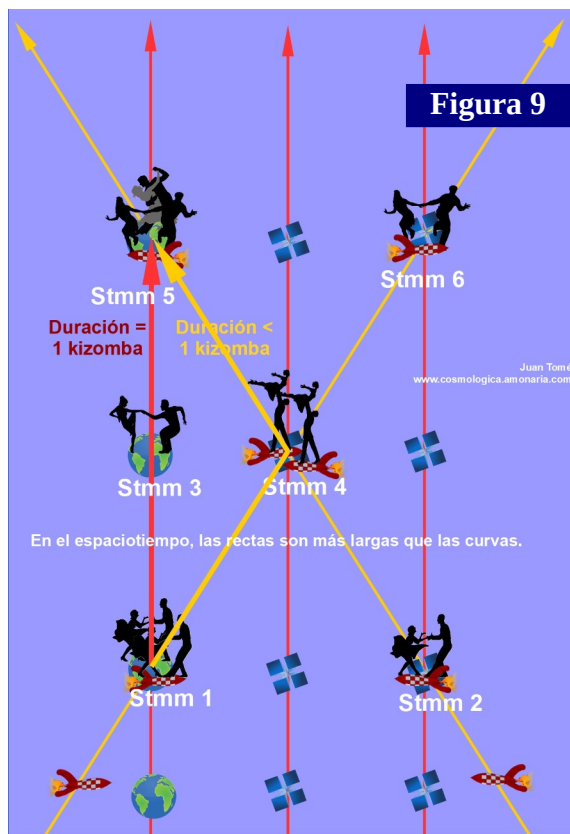
Se deduce entonces que (figura 8) las distancias espaciotemporales Stmm1-Stmm6 y Stmm2-Stmm5 tienen que ser menores² que la Stmm1-Stmm5. En ésta, de duración 4 minutos, cabe entera la kizomba patrón. En las otras, de duración menor que 4 minutos, no cabe entera la kizomba patrón. Ésta es la sencilla razón por la que cuando coinciden en Stmm5 los bailarines del cohete que se mueve hacia la izquierda y los bailarines de la Tierra, éstos han terminado y los otros no.

1 La representación en papel de procesos en el espaciotiempo no puede reflejar correctamente las relaciones de magnitud de las duraciones de distintos procesos. La razón es que las representaciones en papel son euclídeas (ineludiblemente) mientras que las relaciones entre duraciones en el espaciotiempo son pseudoeuclídeas por naturaleza. La geometría del espacio que acoge las representaciones en el papel es la que es, la del espaciotiempo es la que es, y son distintas, así que es imposible que la representación refleje lo representado.

2 En la geometría del espaciotiempo no es el coseno circular sino el hiperbólico (dado en la relaciones de la Teoría de la Relatividad Especial por $\gamma = 1/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$) el que rige la relación de proyección. Como es siempre mayor que 1, las proyecciones en esa geometría son mayores que lo proyectado. Resulta entonces (figura 8), que las distancias espaciotemporales Stmm1-Stmm6 y Stmm2-Stmm5 (lo proyectado) son menores que la Stmm1-Stmm5 (la proyección).

4 La paradoja de la kizomba y la de los gemelos

Es evidente (figura 9) que el “camino” espaciotemporal Stmm1-Stmm4-Stmm5, construido con la mitad del Stmm1-Stmm6 y la mitad del Stmm2-Stmm5, tiene que ser de igual duración que ellos. Es, por tanto, más corto que el Stmm1-Stmm5. Esto ilustra una propiedad general de la geometría del espaciotiempo: si se consideran todos los “caminos” posibles entre dos sitiomomentos del espaciotiempo, el rectilíneo es más largo que los curvos. En nuestro caso, el “camino” recto entre Stmm1 y Stmm5 es más largo que el curvo Stmm1-Stmm4-Stmm5, que también empieza en Stmm1 y acaba en Stmm5. En el camino recto cabe entero el proceso *bailar Mil pasos*; en el curvo no.

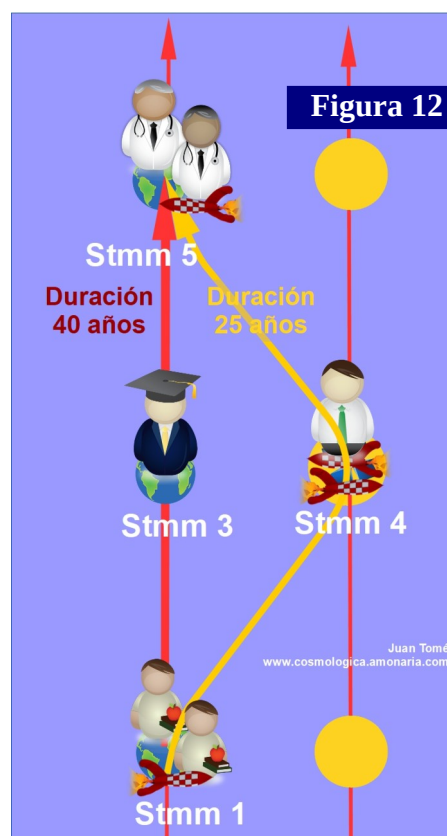
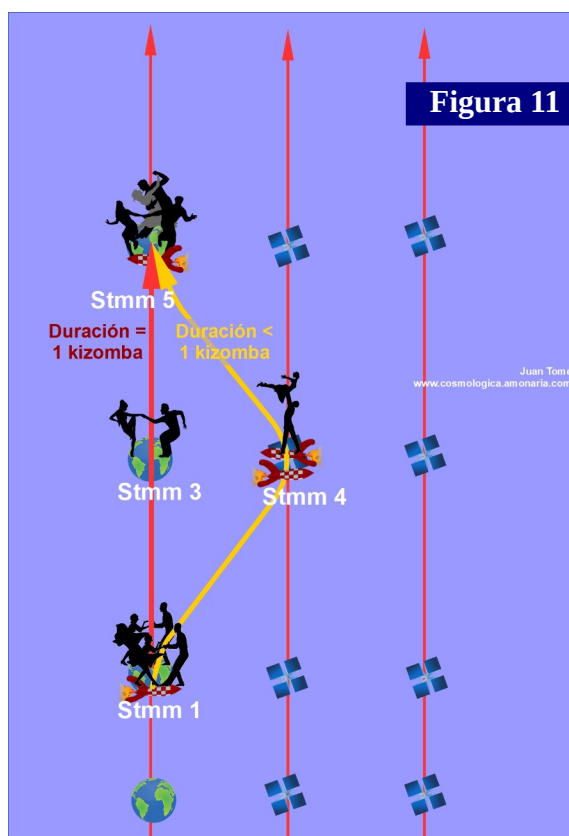


Por eso es fácil predecir (figura 10) lo que sucedería si dos parejas empezaran el proceso *bailar Mil pasos* en Stmm1, una en la Tierra y otra en el cohete que coincide con ella, y la pareja que baila en el cohete se cambiara de cohete en Stmm4 para volver a coincidir con la Tierra en Stmm5, esto es, si esa pareja hace un viaje de ida y vuelta a la estación espacial más cercana a la Tierra mientras baila. Sucedería, como en el caso de las tres parejas, que en Stmm5 la pareja que bailó en la Tierra habría acabado y la que hizo el viaje de ida y vuelta no.

Ciertamente, el cambio instantáneo de cohete que se supone en Stmm4 de la figura 10 es imposible. Un viaje real de ida y vuelta a la estación espacial debería seguir un “camino” espaciotemporal curvo como el que se representa en la figura 11. La curvatura inicial de la línea de universo del cohete significa que el proceso se inclina cada vez más hacia la derecha, esto es que el cohete aumenta su velocidad respecto de la Tierra, que acelera al despegar. Luego, la inclinación (o la velocidad) se mantiene hasta que se acerca a la estación espacial. Entonces la inclinación disminuye hasta llegar a la vertical y empezar a inclinarse cada vez más hacia la izquierda (el cohete frena y luego acelera para cambiar de sentido) hasta alcanzar y mantener la inclinación (la velocidad) de cruce del viaje de vuelta. Ya cerca de la Tierra, la inclinación disminuye (el cohete frena) hasta aterrizar.

La longitud del camino curvo Stmm1-Stmm4-Stmm5 de la figura 11 no es la misma que la del camino quebrado Stmm1-Stmm4-Stmm5 de la figura 10. Por eso es necesario tener en cuenta sus curvas (sus aceleraciones) para calcular con precisión su longitud espaciotemporal, la duración de los procesos que caben en él. Pero la curvatura (la aceleración) no cambia un ápice lo esencial de la

explicación de la paradoja: la pareja que hace el viaje de ida y vuelta no ha acabado su baile cuando la pareja de la Tierra ya lo ha hecho porque el camino Stmm1-Stmm4-Stmm5, sea quebrado o sea curvo, es más corto que el Stmm1-Stmm5, el rectilíneo.



El planteamiento clásico de la paradoja de los gemelos se refiere a un viaje de ida y vuelta. En la figura 12 se representa una versión posible: dos gemelos, niños estudiantes de 10 años, se separan entre Stmm1 y Stmm5 mientras uno de ellos va y vuelve a un astro lejano. Durante la separación, ambos continúan los mismos estudios. Cuando el gemelo sedentario se doctora, el viajero da la vuelta en el astro lejano y todavía no ha terminado su carrera. Cuando se vuelven a reencontrar en la Tierra ambos son ya doctores, pero el viajero es más joven que el sedentario, que peina canas. Éste tiene 50 años y el otro 35. Si saben relatividad y conocen la explicación de la paradoja de la kizomba, deducirán inmediatamente que en el “camino” espaciotemporal rectilíneo Stmm1-Stmm5 (el del sedentario) cupieron 40 años mientras que en el Stmm1-Stmm4-Stmm5 (el del viajero), más corto por ser curvo, sólo cupieron 25.

Si los dos procesos *vida de los gemelos* fueran tan idénticos como los procesos *bailar Mil pasos*, es decir, si se pudiera asegurar que ambos durarán 80 años por ejemplo, sucederá que el proceso vida del gemelo sedentario acabará antes que el proceso vida del gemelo viajero, que aquel morirá antes que éste. Sucederá que dos vidas iguales que empezaron a la vez no terminarán a la vez aunque hayan durado lo mismo.

5 Las claves de la explicación de la paradoja

La primera formulación de la paradoja de los gemelos fue de Langevin, en el IV Congreso Internacional de Filosofía celebrado en Bolonia en 1911. En su ponencia, Langevin describió los efectos de una separación y posterior reencuentro en términos de envejecimiento y de aceleración. Escribió que “envejecen menos aquellos cuyo movimiento durante la separación se haya alejado más de ser uniforme, los que hayan sufrido mayor aceleración” (Langevin, 1911, p 210); y también que “se puede decir que basta agitarse, sufrir aceleraciones para envejecer más despacio” (Langevin, 1911, p 209). Estas frases sugieren comentarios que pueden señalar las claves de la

explicación de la paradoja que se ha dado aquí y orientar la crítica de las muchas explicaciones (no todas correctas) que se pueden encontrar en textos académicos y de divulgación.

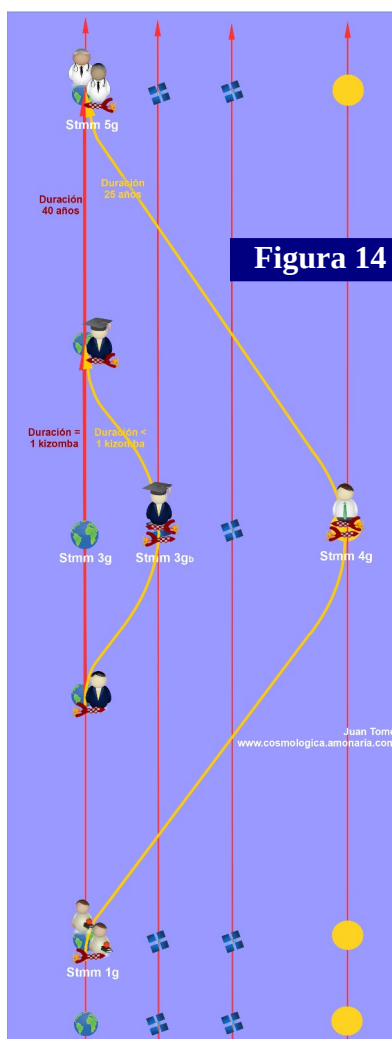
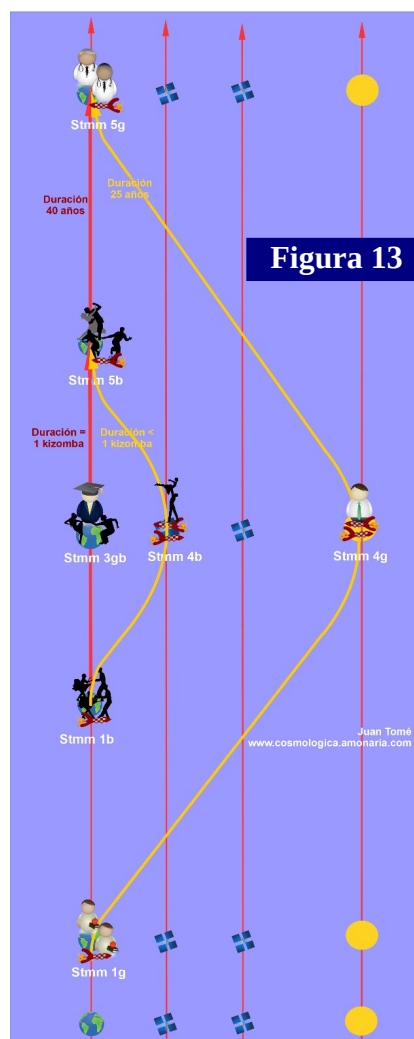
Comentario 1: No es lo mismo «envejecer menos» que «envejecer más despacio».

Es indiscutible que el gemelo viajero «envejece menos». Ese es el hecho desnudo, lo que se constata cuando se encuentran. Pero de eso no se sigue que «envejezca más despacio». De hecho, una de las claves de la explicación que se ha dado aquí es que no hay razón alguna para suponer que a bordo del cohete que va y vuelve cambien los ritmos de los relojes, de la música, del baile o de los procesos biológicos de la vida. Es más, la concepción de los relojes como procesos patrón exige que la duración de esos procesos no cambie, que no cambie el ritmo de los relojes cuando son repeticiones de un proceso patrón elemental.

El gemelo viajero no envejece menos porque los relojes, la música, los bailes o la vida vayan más despacio en el cohete que en la Tierra, no porque cualquiera de esos relojes «atrase», no porque «el tiempo pase más despacio» en el cohete que en la Tierra. Aquí se ha mostrado que la paradoja se produce considerando solo cohetes en movimiento uniforme, así que no puede haber diferencia alguna entre la física de los cohetes y la de la Tierra.

El gemelo viajero «envejece menos» simplemente porque el cohete sigue un “camino” espaciotemporal más corto que el otro, un “camino” en el que caben menos repeticiones de un proceso patrón, sea éste el vaivén de un péndulo de reloj mecánico, la oscilación piezoeléctrica de un reloj electrónico, la oscilación del spín del electrón más externo de un átomo de ^{131}Cs en los relojes atómicos, una kizomba o una vida gemela.

Comentario 2: La aceleración no juega un papel relevante.



Cuando se explica la paradoja en términos de «tiempo que pasa» de distinta manera en la Tierra y en el cohete, se justifica esa diferencia entre la física de la Tierra y la del cohete señalando que es la aceleración lo que rompe la equivalencia obligada por el Principio de Relatividad.

Pero aunque es cierto que la existencia o no de aceleración (de curvatura) distingue físicamente los “caminos” de los gemelos, es fácil mostrar, siguiendo un argumento de Maudlin (Maudlin, 2012), que el papel de la aceleración en la diferencia de edad constatada en el reencuentro es irrelevante.

En la figura 13 se representan los “caminos” que dan lugar a la paradoja de la kizomba y a la de los gemelos. Los tramos curvos de los “caminos” seguidos por los dos cohetes (el de los bailarines y el del gemelo viajero) son iguales. Esto quiere

decir que las aceleraciones de despegue, de dar la vuelta y de aterrizaje son exactamente las mismas para los dos.

En la figura 14 se representa el “camino” espaciotemporal del gemelo que quedó en la Tierra en el supuesto de que hubiera tenido el capricho de doctorarse en un cohete que haga el mismo viaje de ida y vuelta que los bailarines de la kizomba. En este caso, las aceleraciones (las curvaturas) de los “caminos” seguidos por los dos gemelos entre Sitmm1 y Sitmm5 son las mismas. Si hay diferencia de edades en el reencuentro no será a causa de las aceleraciones sufridas. Y resulta que sí hay diferencia, y que es prácticamente igual a la que habría si el gemelo de la Tierra no hubiera tenido el capricho de doctorarse en el cohete. En efecto, el capricho del gemelo terrestre supone un viaje de menos de 1 kizomba, de menos de 4 minutos; y la diferencia entre el “camino” con capricho y el “camino” sin capricho es todavía menor. Así que, si al reencontrarse los gemelos cuando no hubo capricho sus edades diferían 15 años, ahora, cuando lo hubo, las edades diferirán en, digamos, 15 años menos 1 minuto.

De modo que, en el caso del gemelo caprichoso, las aceleraciones ya no permiten distinguir entre los “caminos” de los gemelos ni dar cuenta de los 15 años menos 1 día de diferencia entre sus edades al reencontrarse. Tal diferencia tiene que deberse, exclusivamente, a las propiedades geométricas del espaciotiempo, y así es: la recta entre Sitmm1 y Sitmm5 es el camino de mayor longitud espaciotemporal entre esos sitiomentos, 40 años; el “camino” del gemelo caprichoso se aparta muy poco de la recta, mide 40 años menos 1 minuto; el camino del gemelo viajero se aparta mucho más y es por eso mucho más corto, 25 años. Eso es todo, aunque convenga hacer notar que si el “camino” del gemelo viajero se aparta más del rectilíneo Sitmm1-Sitmm5 que el del caprichoso, no es debido a sus tramos curvos, sino a sus tramos rectos oblicuos a aquel.

Comentario 3: Es clave asumir que los relojes no miden el tiempo abstracto.

La explicación de la paradoja presentada aquí adquiere pleno sentido si se asume que los relojes son procesos patrón, que sus medidas son comparaciones de procesos, que la magnitud medida es la duración de procesos concretos y que la duración se identifica con el tiempo propio relativista y con la longitud espaciotemporal del “camino” que sigue el proceso en el espaciotiempo (Tomé, 2022).

En ese marco conceptual, lo que muestra la paradoja de los gemelos (o la de la kizomba) es que entre dos sitiomentos del espaciotiempo puede haber dos (o más) procesos que los conecten siguiendo “caminos” de distinta duración. Y eso debe parecer tan normal como que entre dos ciudades haya dos (o más) carreteras de distinta longitud. De forma que, lo mismo que los cuentakilómetros de dos coches que vayan de una de esas ciudades a la otra por esas distintas carreteras no marcarán lo mismo al llegar aunque marcaran lo mismo al salir (Bondi, 1980, p 87), así dos relojes que midan la duración de los distintos procesos que conecten aquellos dos sitiomentos resultarán desincronizados cuando coincidan en el sitiomento final aunque estuvieran sincronizados en el sitiomento de partida. Y esto vale para relojes mecánicos, electrónicos, atómicos, para relojes bailados o para relojes vividos.

6 Referencias

Bondi, Hermann (1980). *Relativity and common sense*. New York: Dover Publications.

Langevin, Pierre (1911). L'Évolution de l'espace et du temps. *Atti IV Congresso Internazionale di Filosofia*, vol 1, pp 193-214. Bolonia.

Maudlin, Tim (2014). *Filosofía de la física. I El espacio y el tiempo*. México D.F.: Fondo de Cultura Económica.

Tomé, Juan (2021). Relatividad Especial: una interpretación del fenómeno de la dilatación temporal, *Revista Española de Física*, 35- 2, 7-11.

Tomé, Juan (2022). Los relojes y el significado de sus medidas (Texto para ponencia oral). Bienal de la RSEF, Murcia. www.cosmologica.amonaria.com/los-relojes-y-el-significado-de-sus-medidas/