

Juan Tomé

Relatividad: algunos hechos probados y una explicación

Universidad de la Experiencia – Autónoma - Madrid NOV24



Este texto resume los contenidos abordados en una sesión de trabajo del curso de la Universidad de la Experiencia dirigido por el profesor Javier Ordóñez. El objetivo era presentar aspectos clave de la Teoría de la Relatividad a personas no especialistas. La sesión tuvo lugar en el salón de actos de la Facultad de Filosofía de la Universidad Autónoma de Madrid el 27 de noviembre de 2024. El texto se acompaña de las imágenes que sirvieron de apoyo para el discurso que se desarrolló. Al final, se listan referencias para profundizar en lo que este texto, por su carácter introductorio, sobrevuela.

1 Introducción

Toda reflexión sobre Relatividad requiere salirse de las rutas habituales del pensamiento sobre el espacio y el tiempo como sustratos de los fenómenos físicos, y obliga a seguir senderos poco trillados. Seguir esos senderos supone romper con las concepciones personales más básicas acerca de la realidad física: las relacionadas con sus aspectos espaciales y temporales.

Por eso, el discurso que sigue se estructura señalando el punto de partida, el de llegada, y siete bifurcaciones en las que el camino del discurso se separa del pensamiento habitual. En cada bifurcación, se recapitula sobre lo recorrido, con la intención de abordar las dificultades siguientes con seguridad. Cada una de las bifurcaciones viene a ser como un punto de encuentro, de descanso o de reagrupamiento de quienes siguen el discurso, un punto seguro desde el que continuar.

El pensamiento habitual, el de cada uno, se resiste a seguir esas bifurcaciones. Lo normal es sentir una tendencia muy fuerte a seguir la propia manera de pensar. Lo normal es que, al final del recorrido, y aún a pesar de haber seguido con atención las indicaciones de todas las bifurcaciones, se tenga la sensación (la que tiene todo el mundo que recorre caminos no habituales por primera vez) de no poder volver a recorrerlo en solitario. Lo que se espera de la primera vez que se hace una ruta es que resulte atractiva, que alguno de sus rincones resulte deslumbrante, que provoque cierta necesidad de repetirla con más calma.

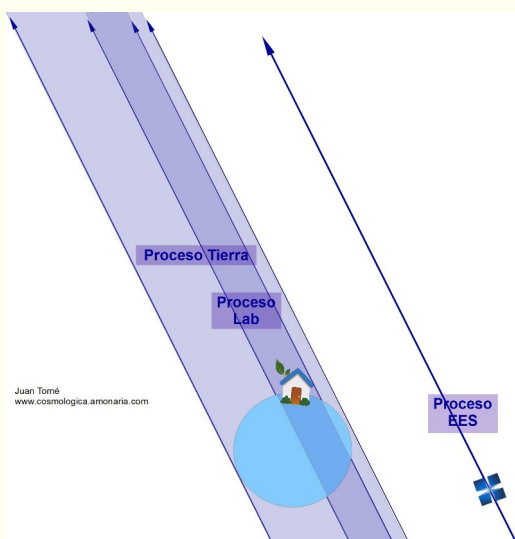
2 Punto de partida: *La Teoría de la Relatividad está sobradamente probada.*

La Teoría de la Relatividad (TR) no es una teoría pendiente de confirmación. Actualmente es, más bien, un saber práctico que tiene aplicaciones cotidianas de las que nos servimos todos. La determinación de la hora planetaria mediante los relojes de la red del Tiempo Atómico Internacional (TAI) o el correcto funcionamiento de las redes de satélites de geolocalización (GPS por ejemplo) dependen del conocimiento del fenómeno de desincronización de relojes que la TR predice.

La paradoja de los gemelos (dos gemelos que se separaran jóvenes constatarían al reencontrarse que sus edades biológicas son distintas, es decir, que se han desincronizado) ya no es la proposición imaginaria que ha servido para profundizar en los significados de los fenómenos relativistas, porque se ha probado experimentalmente que relojes atómicos (de extraordinaria constancia en sus ritmos) que se separan marcando lo mismo están desincronizados cuando se vuelven a juntar.

Los fenómenos de desincronización de relojes no son los únicos que la TR predice y explica, pero son a los que se restringe este discurso.

3 Primera bifurcación: *Pensar en procesos, no en objetos y tiempo por separado.*



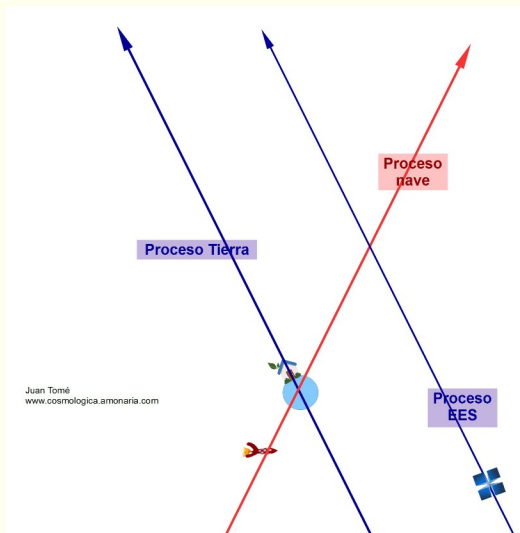
Los fenómenos relativistas son intrínsecamente cuatridimensionales. Los elementos apropiados para su descripción son los procesos, que mezclan íntimamente aspectos temporales y espaciales siendo, por ello, de naturaleza cuatridimensional. Las ideas de “objeto” (tridimensional) y “tiempo” (unidimensional) por separado no son apropiadas para la descripción de los fenómenos relativistas.

Los procesos son colecciones de cambios causalmente concatenados de acuerdo con leyes científicas bien establecidas. Hay procesos complejos (el proceso Tierra por ejemplo) que se pueden considerar compuestos de procesos más simples.

Los procesos simples se representan mediante líneas de universo. Los complejos mediante hojas, o bandas, de universo. Si no se quiere analizar fenómenos relacionados con magnitudes espaciales, y con el fin de simplificar las representaciones, también se pueden representar mediante líneas de universo los procesos complejos.

Es importante reconocer que las líneas de universo no son trayectorias en el espacio (las de las figuras que acompañan el texto no van “hacia arriba”) sino representaciones de conjuntos de cambios, algo así como “historias”. Sus direcciones apuntan hacia donde los cambios se producen, a los “futuros” de cada proceso y, se repite, sus direcciones no son espaciales sino espaciotemporales.

4 Segunda bifurcación: *Pensar en oblicuidad de procesos, no en movimiento.*



Las distintas direcciones de las líneas de universo reflejan las distintas direcciones espaciotemporales de cambio de los procesos.

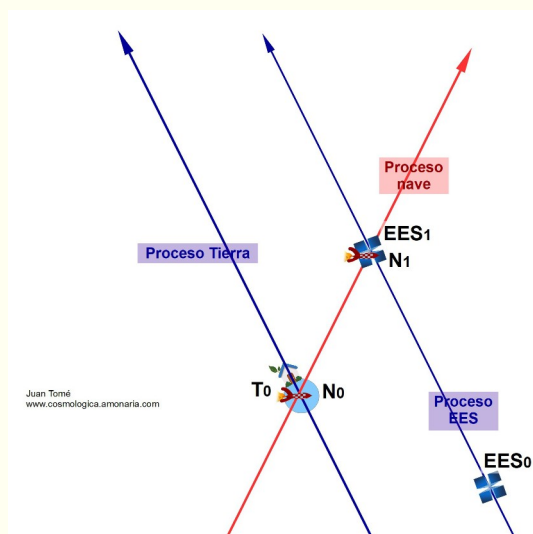
Los procesos paralelos (los que se desarrollan en la misma dirección) se perciben en reposo relativo porque mantienen su separación espacial. Los oblicuos (los que se desarrollan en distinta dirección) se perciben en movimiento relativo porque su separación espacial varía. El movimiento es la percepción tridimensional cambiante (la única que nos es posible como procesos que somos) de la oblicuidad cuatridimensional de dos procesos.

La velocidad relativa medida es tanto mayor cuanto mayor es la oblicuidad relativa de los procesos.

En las representaciones que acompañan este texto, como en todas las de tipo minkowskiano (en honor de Minkowski, que las propuso en 1908), la máxima inclinación de las líneas de universo, de los procesos, es 45° respecto de la vertical, inclinación que corresponde a los procesos luz. La velocidad relativa medida de los procesos luz es la máxima posible, y siempre es, además, la misma. Por eso en las representaciones minkowskianas los procesos luz se dibujan siempre inclinados 45° .

5 Tercera bifurcación: *Sitiomomentos, no posiciones y tiempos.*

Los hechos físicos ocurren en distintos sitiomomentos, no en un sitio en distintos momentos.



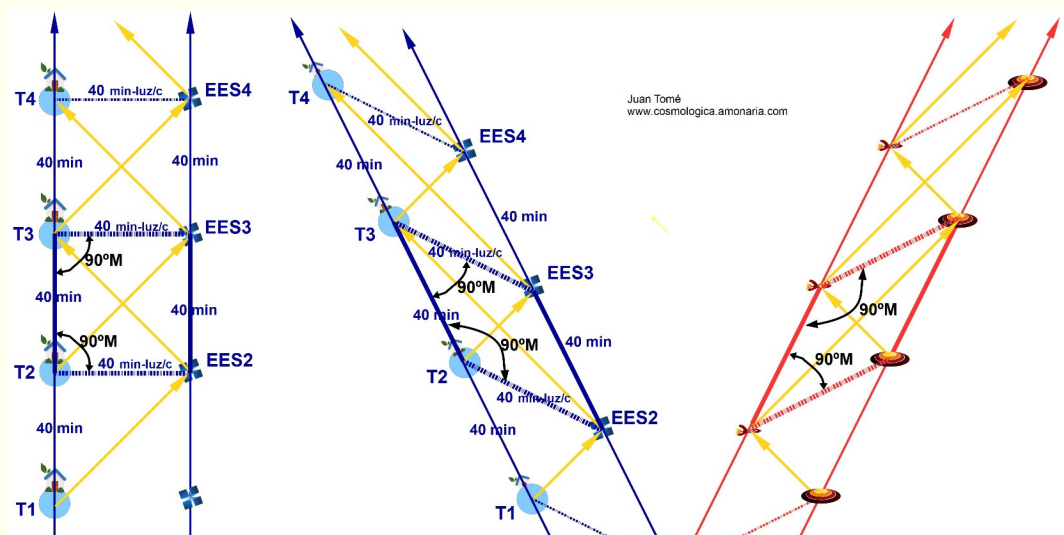
Los hechos que nos interesan en este discurso son las coincidencias espaciotemporales de dos procesos. Esos hechos definen sitiomomentos que se representan en las figuras como cruces de líneas de universo. Por ejemplo, en la figura adjunta, $T_0 \equiv N_0$ es el sitiomomento donde coinciden los procesos Tierra y Nave, y $EES_1 \equiv N_1$ es el sitiomomento donde coinciden los procesos Nave y Estación espacial.

No es cierto en Relatividad, contra el lugar común, que “todo es relativo”. Por ejemplo, los hechos físicos definidos por coincidencias de procesos son absolutos: todos los observadores que estudien los procesos Tierra, Nave y Estación espacial estarán de acuerdo en que se cruzan y en que se cruzan en los sitiomomentos indicados. Es cierto que unos les asignarán unas

coordenadas y otros otras, pero todos coincidirán en la magnitud de su separación espaciotemporal, la longitud del segmento N_0-N_1 de la figura.

Los movimientos conectan sitios siguiendo rutas espaciales, carreteras por ejemplo. Muy distinto es lo que hacen los procesos: conectar sitiomomentos siguiendo rutas espaciotemporales, líneas de universo.

6 Cuarta bifurcación: *Los “presentes” (o los “ahoras”) son relativos.*



“Ahora”, o “presente”, es la colección de hechos físicos de la que un observador afirma que suceden a la vez o son simultáneos. Pero lo que “sucede a la vez” para un observador no es lo mismo que lo que “sucede a la vez” para otro oblicuo a él, porque, del mismo modo que hay distintas direcciones de cambio, hay distintas direcciones para las líneas de simultaneidad.

La figura de arriba muestra las líneas de simultaneidad para dos procesos paralelos en tres casos distintos. A la izquierda, para procesos “verticales”, las líneas de simultaneidad son horizontales; en el centro, para procesos “inclinados hacia la izquierda”, el cuadrado de simultaneidad de los procesos “verticales” se transforma en rombo “inclinado hacia la izquierda”; a la derecha, para

Diagram illustrating the relativity of simultaneity. It shows three worldlines: Earth (EES), a spaceship (EES1), and another spaceship (EES0). Earth's worldline is vertical. EES1 moves upwards at 40 million light-years per century. EES0 moves downwards at the same speed. Two events, T1 and T0, are marked on the Earth worldline. T1 is simultaneous with EES1's position at that time in the Earth frame. T0 is simultaneous with EES0's position at that time in the Earth frame. In the EES1 frame, T1 is simultaneous with EES1's position, but T0 is not. In the EES0 frame, T0 is simultaneous with EES0's position, but T1 is not. The diagram shows that events simultaneous in one frame are not simultaneous in another.

1) La línea de simultaneidad (el “ahora”, el “presente”) para el proceso Tierra y el proceso Estación espacial correspondiente al sitiomomento $EES_1 \equiv N_1$.

Como tales líneas son distintas, mientras que los observadores de la Tierra y de la Estación espacial dirán que el hecho T_1 del proceso Tierra sucede a la vez que el N_1 del proceso nave, los observadores del proceso Nave dirán que es el hecho $T_{1\text{ nave}}$ del proceso Tierra (anterior al T_1) el que sucede a la vez que el N_1 .

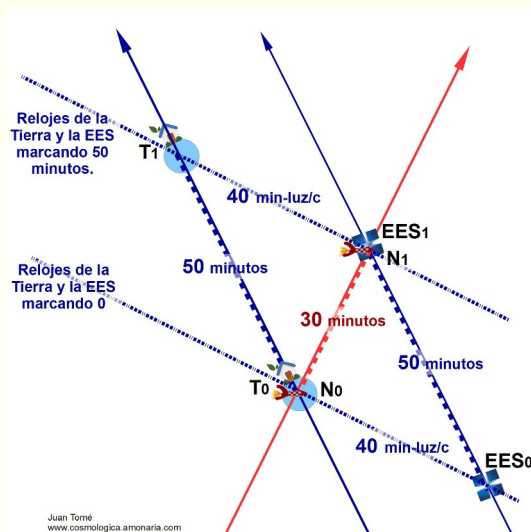
7 Quinta bifurcación: *Los relojes no miden el tiempo, sino duraciones de procesos.*

La duración de un proceso entre dos sitiomomentos es el número de tictacs que caben en él, y da la separación espaciotemporal entre esos sitiomomentos, la longitud de la línea de universo que los una.

y EES_1 . Muestra también que los relojes de la Nave contarían los tictacs correspondientes a 30 minutos entre N_0 y N_1 . Pues bien, el significado de esas medidas es el siguiente:

- 1) Que todos los procesos (físicos o biológicos) que tuvieran lugar en la Tierra entre T_0 y T_1 , o en la Estación espacial entre EES_0 y EES_1 , desarrollarían los cambios que para cada uno de ellos ocuparan 50 minutos.
- 2) Que todos los procesos (físicos o biológicos) que tuvieran lugar en la Nave entre N_0 y N_1 desarrollarían los cambios que para cada uno de ellos ocuparan 30 minutos.
- 3) Que la separación espaciotemporal entre T_0 y T_1 es igual a la que hay entre EES_0 y EES_1 . Y que, en cambio, la separación espaciotemporal entre N_0 y N_1 es menor que esas. Es decir, que espaciotemporalmente hablando, los sitiomomentos N_0 y N_1 son más cercanos que los T_0 y T_1 o que los EES_0 y EES_1 .

8 Sexta bifurcación: *Procesos que empiezan y terminan a la vez no tienen por qué durar lo mismo.*



La figura de la izquierda muestra dos “ahora” de los procesos Tierra y Estación espacial (como están en reposo relativo comparten “presente”): el que definen sus relojes marcando 0 (cuando coinciden Tierra y Nave) y el que definen sus relojes marcando 50 minutos (cuando coinciden Nave y Estación espacial).

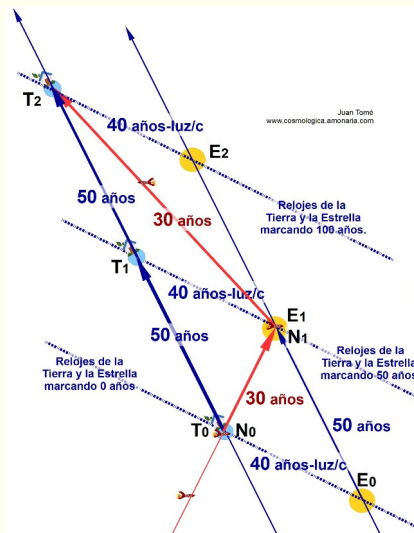
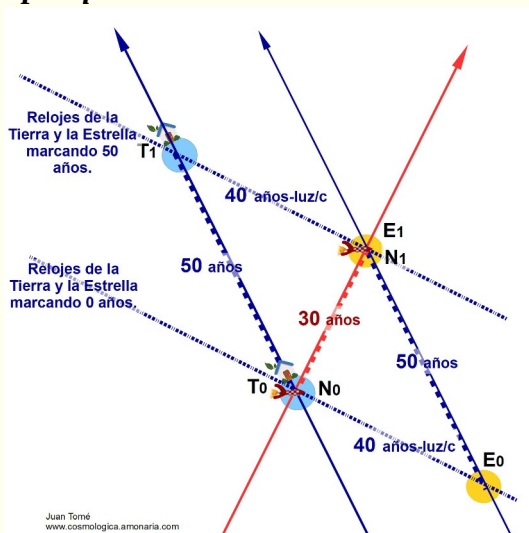
A la vista de ella es claro que, según los observadores de la Tierra y de la Estación espacial, el proceso Tierra entre T_0 y T_1 empieza y termina a la vez que el proceso Nave entre N_0 y N_1 . Sin embargo, uno dura 50 minutos y el otro 30.

En este punto del discurso, no debiera ser imposible admitir ese hecho, aunque vaya contra uno de los pilares de nuestra experiencia común acerca de lo temporal: que

si dos viajes, o dos esperas, o dos vidas, empiezan y terminan a la vez es que han durado lo mismo.

La clave para asumir ese hecho es reconocer que las medidas de reloj son direccionales; que no es lo mismo medir una duración en la dirección del proceso Tierra que medir otra en la dirección del proceso Nave. La clave es reconocer que los relojes no miden el tiempo que pasa, sino duraciones de procesos concretos que pueden ser de distintas direcciones espaciotemporales.

9 Séptima bifurcación: *Procesos que empiezan y terminan en los mismos sitiomomentos no tienen por qué durar lo mismo.*



La figura de la izquierda es similar a la anterior, salvo un cambio de escala que se realiza para acomodarla a la explicación de la paradoja de los gemelos. La nave espacial no conecta ahora el proceso Tierra con un proceso Estación espacial distante 40 minutos-luz, sino con un proceso Estrella distante 40 años-luz. Como antes, T_1 y E_1 son hechos del proceso Tierra y del proceso Estrella que suceden a la vez según los observadores de la Tierra, y son los que definen la llegada de la Nave a la Estrella. Podemos suponer que los gemelos se separan al nacer, que uno embarca en la Nave que lo lleva a la Estrella y el otro queda en la Tierra.

La figura de la derecha incorpora la vuelta de la Nave desde la Estrella a la Tierra, llevando a bordo al gemelo viajero, hasta el sitiomomnto del reencuentro con su hermano. Es evidente que el viaje de

vuelta debe durar lo mismo que el de ida, y que la espera en la Tierra durante la vuelta debe durar lo mismo que la espera durante la ida. Por tanto, al considerar la ida y la vuelta, queda claro que los relojes de la Tierra contaron 100 años entre T_0 y T_2 , y que los relojes de la nave contaron 60 años entre T_0 , E_1 y T_2 . Lo que esas medidas de reloj significan es:

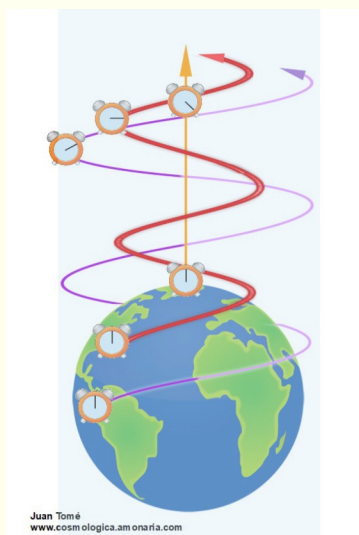
- 1) Que la longitud de la línea de universo del proceso Tierra entre T_0 y T_2 es mayor que la del proceso Nave entre T_0 , E_1 y T_2 .
- 2) Que todos los procesos (físicos o biológicos) que tuvieran lugar en la Tierra entre T_0 y T_2 desarrollaron los cambios que para cada uno de ellos ocuparan 100 años. En particular, para el gemelo que quedó en la Tierra, su proceso vida habría estado durando 100 años.
- 3) Que todos los procesos (físicos o biológicos) que tuvieran lugar en la Nave entre T_0 , E_1 y T_2 desarrollaron los cambios que para cada uno de ellos ocuparan 60 años. En particular, para el gemelo que viajó a la Estrella y volvió, su proceso vida habría estado durando 60 años.

Lo que esas medidas de reloj demostrarían es que dos sitiomomentos pueden estar conectados por procesos (“caminos”) distintos, que pueden ser de distinta duración (de distinta “longitud espaciotemporal”). El “camino” que sigue el gemelo sedentario entre el sitiomomento de separación de su hermano y el sitiomomento de reencuentro dura 100 años. El que sigue el viajero, entre esos dos mismos sitiomomentos, mide 60. Esa es la razón de la desincronización de sus vidas.

No se necesita recurrir a tiempos que pasan más deprisa o más despacio para explicar lo que sucede a los gemelos; tampoco a que la vida de uno se alargue respecto a la del otro. Los ritmos vitales de los dos gemelos se mantienen y eso es lo que hace que sus relojes biológicos (como el resto de relojes de la Tierra o de la Nave) midan 100 años entre T_0 y T_2 y 60 entre T_0 , E_1 y T_2 . Si suponemos que, por ser gemelos, sus vidas durarán lo mismo, lo que sucederá es que el gemelo centenario morirá pronto tras el reencuentro y el otro vivirá todavía 40 años antes de morir. Lo que sucederá es que dos vidas de 100 años que empezaron a la vez no terminarán a la vez. Nada más.

Las medidas de reloj dependen del camino, no de los sitiomomentos extremos. Por eso, cuando dos relojes de calidad empiezan a medir en un sitiomomento (el mismo para los dos) marcando lo mismo y terminan de medir en otro (el mismo para los dos) marcando distinto es porque han medido cosas distintas: duraciones de procesos distintos o, lo que es equivalente, longitudes de líneas de universo distintas.

10 Punto de llegada: *Los relojes se desincronizan cuando miden cosas distintas.*



Partió este discurso de hechos relativistas probados que afectan a relojes de cuyo desempeño nos beneficiamos todos: a los relojes de la red del Tiempo Atómico Universal (TAI) y a los relojes de las redes de posicionamiento global (red GPS por ejemplo). Los hechos son que esos relojes, de la máxima calidad, se desincronizan diariamente, y necesitan ser corregidos para mantener el correcto funcionamiento de sus redes.

La razón de la desincronización se puede enunciar ahora con pocas palabras: se desincronizan porque, día tras día, siguen líneas de universo distintas. Ligados a la Tierra en su rotación (relojes TAI), o siguiendo órbitas (relojes GPS), todas sus trayectorias espaciales son casi circulares, pero de radios distintos según las latitudes de los laboratorios que alberguen los relojes TAI y según las alturas de las órbitas de los satélites GPS. Las líneas de universo correspondientes podrían idealizarse como helicoides de distintas amplitudes. Sin entrar

en los detalles necesarios para la justificación precisa de las desincronizaciones que sufren, no cabe duda de que los distintos relojes de esas redes siguen líneas de universo distintas, lo que da la clave de su desincronización diaria: cada reloj mide, cada día, la longitud de su línea de universo. Como cada uno sigue líneas de universo distintas, dan resultados distintos.

La proposición final que sintetiza todo lo argumentado y devuelve al punto de partida con una explicación bajo el brazo sería: los relojes de máxima calidad de las redes TAI y GPS, así como los relojes biológicos de los gemelos, se desincronizan porque miden bien.

11 Referencias para entrar en más detalles

Tomé, J., [Relatividad Especial: una interpretación del fenómeno de la dilatación temporal](#), Revista Española de Física, 35-2 (2021), pp 7-11

Tomé, J., [Adelantamiento de trenes en el espaciotiempo](#), Revista Española de Física, 36-4 (2022), pp 10-15

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

Tomé, J., [Universo de procesos: realidad física cambiante y cuadridimensional](#), ArtefaCToS, 13-2 (2024), pp 273-299

En www.cosmologica.amonaria.com, Científica / Relatividad del menú principal, pueden verse “[Los relojes y el significado de sus medidas](#)”, “[Chef relativistas](#)” y “[La paradoja de la kizomba](#)”.

Contacto: casa@amonaria.com