

de 100 W. Al cabo de una hora, la imagen térmica (Figura 9) muestra cómo el coche del vaso cerrado alcanza mayor temperatura (42°C) comparado con el situado dentro del vaso abierto (39°C), que permite salir a parte de la radiación infrarroja y del calor por convección.



Figura 9. Demostración del efecto invernadero: el coche del interior del vaso cerrado alcanza mayor temperatura que el coche situado dentro del vaso abierto.

Es posible comprobar la diferente absorción de radiación IR entre el aire y un gas de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, a partir de un globo lleno de aire y otro de CO_2 , gas obtenido de un cartucho de sifón para carbonatar bebidas. Para ello, detrás de cada globo se colocan sendos muñecos de plástico, previamente introducidos en un frigorífico durante una hora para que estén a la misma temperatura. En la imagen térmica (Figura 10) se observa cómo la temperatura aparente que marca la superficie del muñeco situado detrás del globo lleno de CO_2 (15°C) es menor que la del muñeco colocado detrás del globo de aire (14°C), lo que indica que el CO_2 ha absorbido mayor cantidad de radiación infrarroja. Resultado lógico, si tenemos en cuenta que los principales gases que constituyen el aire (nitrógeno, oxígeno, argón) no absorben ni emiten radiación IR.

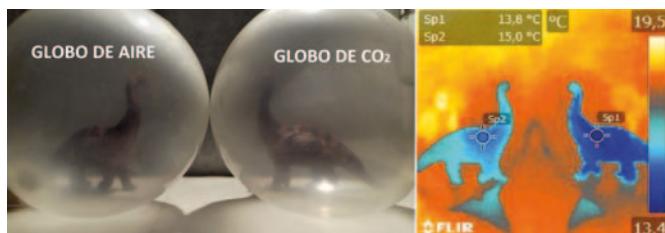


Figura 10. Comparativa de la absorción de la radiación IR entre el aire y el dióxido de carbono: el CO_2 absorbe mayor cantidad de radiación IR.

Los sensores de CO_2 utilizados para comprobar la correcta ventilación de estancias, y controlar la propagación de epidemias como la COVID-19, constan de un emisor de radiación infrarroja y un receptor que recibe la radiación atenuada de forma proporcional a la concentración de CO_2 contenido en el aire.

Estas, y otras demostraciones termográficas que se pueden consultar en las referencias [4], han sido expuestas en diferentes eventos: al público en general, en el stand de la RSEF durante la Feria Madrid por la Ciencia y la Innovación 2019 (IFEMA), a los docentes, en un taller patrocinado por la RSEF durante las X Jornadas de la Enseñanza de la Física (Caixaforum-Madrid), y presentadas al XVI Concurso Ciencia en Acción, donde obtuvieron el primer premio en la sección Demostraciones de Física.

Conclusiones

La existencia en el mercado de modelos de cámaras termográficas cada vez más económicas hace que sea una buena ocasión para que los docentes incorporen a sus departamentos didácticos este instrumento científico con un gran potencial para la docencia de la física en ESO y Bachillerato. Las aplicaciones de la cámara son numerosas, lo que permite su aprovechamiento dentro del aula, en el laboratorio o en cualquier otro espacio.

A partir de la visión infrarroja, no solo se consigue mejorar la comprensión de determinados fenómenos físicos relacionados con el calor, sino también aumentar la motivación e interés del estudiante hacia la física, contribuyendo a la mejora de resultados y al incremento en el número de alumnos que optan por la modalidad del bachillerato científico. Este interés de los estudiantes igualmente se refleja en su deseo de participar como monitores en ferias de ciencia para transmitir la importancia y el atractivo de esta tecnología. Por todo ello, podemos concluir que la cámara térmica es un fascinante recurso para la didáctica y divulgación de la física que no debería faltar en ningún centro de enseñanza preuniversitaria.

Referencias

- [1] M. VOLLMER y K. MöLLMANN, *Termografía infrarroja: fundamentos, investigación y aplicaciones* (Ed. Universita Politècnica de València, 2013).
- [2] TVE. Programa Órbita Laika, “¿Cómo funciona y para qué se emplea una cámara termográfica?”, (2015). <https://www.rtve.es/alacarta/videos/orbita-laika/orbita-laika-demostracion/3302499/>
- [3] C. XIE y E. HAZZARD, “Infrared imaging for inquiry-based learning”. *The Physics Teacher* 49, 368-372, (2011).
- [4] F. PRADA, “La termografía infrarroja: un sorprendente recurso para la enseñanza de la física y la química”, *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 13 (3), 617-627 (2016). <http://hdl.handle.net/10498/18501>

Relatividad Especial: una interpretación del fenómeno de la “dilatación temporal”

Juan Tomé
Catedrático de Física y Química de Secundaria,
Malpartida de Plasencia (Cáceres)



Este artículo presenta una interpretación de la relación $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$, la que refleja el fenómeno de la “dilatación temporal”. Se basa en las bien conocidas propiedades

geométricas del espaciotiempo, pero se construye mediante los conceptos de *universo de procesos*, *proceso*, *reloj* y *duración*, que se usan con el significado físico que se precisa en el texto, y cuyos correspondientes formales respectivos son espaciotiempo, línea de universo, línea de universo pautada e intervalo espaciotemporal.

La “dilatación temporal”

En la Teoría de la Relatividad Especial (TRE), para dos Sistemas de Referencia (SR) en movimiento relativo con velocidad v constante, y para dos sucesos en reposo en uno de ellos, la transformación de Lorentz de la coordenada temporal se reduce a la relación

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0 \quad (1)$$

siendo $\gamma = 1/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$, y en la que los significados precisos de Δt_0 y Δt , formulados en el lenguaje habitual, son los siguientes:

- $\Delta t_0 \equiv$ intervalo temporal entre los dos sucesos medido por un reloj en reposo respecto del objeto al que ambos sucesos se refieren. Es el tiempo propio entre los dos sucesos.
- $\Delta t \equiv$ intervalo temporal entre los dos sucesos medido por los relojes (se necesitan dos al menos) del SR en que el objeto al que los dos sucesos se refieren es móvil con velocidad v constante.

Se abrevia todo eso diciendo que Δt_0 es el intervalo temporal en el SR móvil y que Δt es el intervalo temporal en el SR en reposo. Como siempre es $v < c$, resulta siempre que $\Delta t > \Delta t_0$. En consecuencia, suele concluirse que “los relojes en movimiento atrasan”, o que “el tiempo transcurre más lentamente en el SR móvil que en el SR en reposo”.

Para los físicos relativistas, conocedores del significado preciso de la ecuación (1), no hay problemas para entender esas frases como titulares de entrada al fenómeno de la “dilatación temporal”. Pero es fácil que los no especialistas las malinterpretan, precisamente porque intentan la explicación de un fenómeno esencialmente espaciotemporal usando el lenguaje común, que separa espacio y tiempo por razones originarias. Se presenta a continuación un lenguaje que integra lo espacial con lo temporal y que permite construir una interpretación de la relación (1) accesible a los no especialistas. Los términos *universo de procesos*, *sitiomomento*, *proceso*, *reloj* y *duración* son la base de ese lenguaje. En el siguiente epígrafe se precisa el significado con el que se usan en todo este artículo.

Universo de procesos: realidad física intrínsecamente cuadridimensional

En la TRE, un suceso es un hecho físico. Su descripción requiere la determinación del *dondécuando* se produce. Se corresponde con un punto del espaciotiempo. Se resalta su carácter cuadridimensional llamando *sitiomomento* a ese punto. Un suceso es una realidad física y el *sitiomomento* sería su correlato formal.

Un conjunto de sucesos causalmente conectados es un *proceso*. Un proceso es una realidad física y su correlato formal sería una línea de universo. El conjunto de todos los procesos es el *universo de procesos* relativista. El espaciotiempo sería su correlato formal.

En esa visión de la realidad física, los elementos básicos son los procesos, que incorporan en su definición la dimensión del cambio. Los procesos pueden desarrollarse en cualquier dirección del espaciotiempo que esté permitida por la conexión de causalidad. Hay procesos paralelos, pero en general son oblicuos entre sí. El movimiento relativo sería la percepción de esa oblicuidad; el paralelismo se percibe como reposo relativo. En la concepción clásica solo hay una dirección del cambio; en el universo de procesos relativista hay tantas como grupos de procesos paralelos.

Los *relojes* son *procesos patrón*, repetibles tan fielmente como sea posible. El vaciado de las clepsidras, el vaivén del volante de relojes mecánicos o la transición hiperfina de los átomos de ^{133}Cs de relojes atómicos, son ejemplos de procesos patrón. Como los relojes modernos los repiten automáticamente pueden considerarse ritmos patrón. La comparación de un proceso con un reloj es una medida. Cuando el reloj, un proceso pautado por repetición, se tiende junto al proceso con el que se compara (cuando la línea de universo del reloj y la del proceso se superponen), el resultado refleja una propiedad física del proceso, su *duración*, cuantificada por el número de veces que el proceso patrón cabe en él. El correlato formal de la duración es el intervalo espaciotemporal, la longitud cuadridimensional de la línea de universo que corresponde al proceso.

La duración coincide siempre con el tiempo propio relativista, que tiene dos propiedades definitorias: predicarse de una línea de universo concreta y tener carácter absoluto, en correspondencia con la invariancia del intervalo métrico espaciotemporal. Para la duración, esas dos propiedades se derivan de su definición. Por un lado, la duración resulta de la comparación de dos entidades físicas homogéneas: un proceso cualquiera y un proceso pautado, un reloj, de forma que la duración siempre es propia, propia de algún proceso concreto. Por otro, un proceso es una realidad física absoluta: los hechos que lo constituyen son hechos para todos los observadores. La duración del proceso es, por tanto, una magnitud física absoluta, independiente del SR.

Dado que el cambio es ubicuo y permanente, que no existen sistemas materiales inmutables, todo puede ser considerado proceso: trenes, estaciones, partículas, laboratorios, relojes, gemelos, naves espaciales y planetas lejanos. Las partículas serían procesos elementales; los demás de la lista serían procesos complejos, colecciones de procesos más simples, prácticamente paralelos y ligados entre sí. Todos ellos son protagonistas de fenómenos clásicos de los trabajos de introducción o divulgación de la TRE. Dos de esos fenómenos se explican a continuación usando los términos *proceso*, *universo de procesos*, *reloj* y *duración* con el significado que se ha intentado precisar en este epígrafe. Por referirse a realidades de cuatro dimensiones integradas, son muy útiles para describir los fenómenos relativistas de una forma que puede facilitar su comprensión.

Experiencia mental del tren que viaja entre estaciones

Un tren hace, a velocidad v constante, un recorrido que tiene dos estaciones, A y B, en las que no para. El reloj de la máquina del tren y los de las estaciones marcan lo mismo cuando pasa por A. Pero cuando llega a B, los relojes de las estaciones marcan más que el de la máquina. Si la velocidad

del tren fuera $0,7c$ y el reloj del tren marcará, por ejemplo, 25 segundos, los de las estaciones marcarán 35, de acuerdo con la ecuación (1). La experiencia es un ejemplo de “dilatación temporal”: se dice habitualmente que “el reloj de la máquina del tren atrasa” o que “el tiempo pasa más despacio en el tren que en las estaciones”.

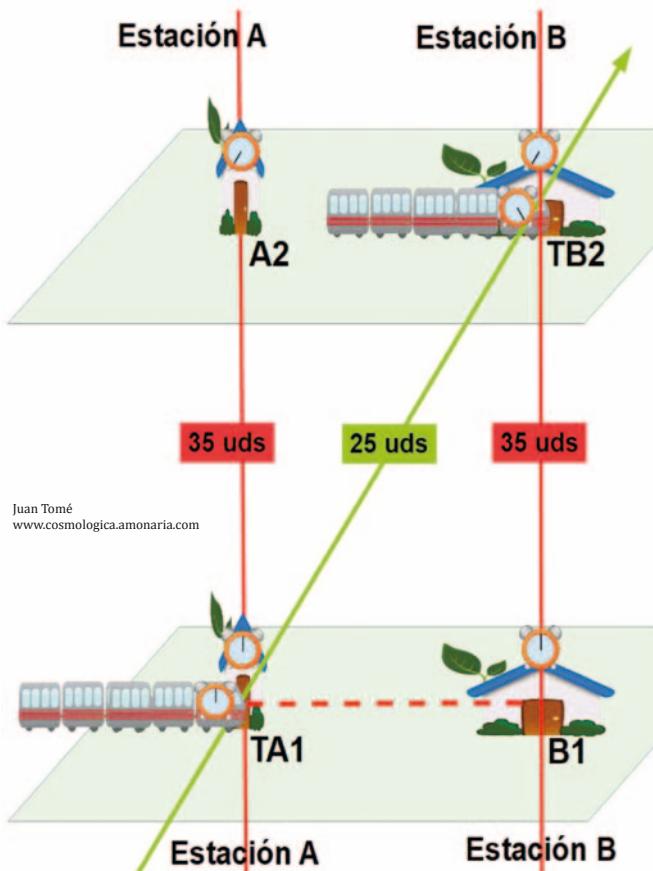


Figura 1

En la visión del universo de procesos, el tren y las estaciones son procesos oblicuos, de direcciones distintas en el espaciotiempo. Las líneas de universo correspondientes se representan en la Figura 1: rojas las de las estaciones y verde la de la máquina del tren. Los planos dibujados son planos de simultaneidad en los SR de las estaciones. La oblicuidad del “proceso tren” respecto a los “procesos estaciones” se percibe como movimiento relativo.

También los relojes de la experiencia son procesos, procesos pautados que, tendidos en paralelo al “proceso tren” o a los “procesos estaciones”, permiten contar las unidades que caben en ellos, medirlos.

El reloj de la máquina del tren mide la duración del proceso “tren entre TA1 y TB2”, que coincide con el tiempo propio entre los sucesos “paso de la máquina por la estación A” y “paso de la máquina por la estación B”, y que es la longitud del segmento de línea de universo TA1-TB2. Para hacer esta medida basta el reloj de la máquina. El resultado es $\Delta t_{0\text{TA1-TB2}} = 25$ segundos.

El reloj de la estación B, sincronizado con el de la estación A, mide la duración del proceso “estación B entre B1 y TB2”, que coincide con el tiempo propio entre los sucesos “reloj de B marcando lo mismo que el reloj de A cuando la máquina pasa por A” y “paso de la máquina por la estación B”, y que es la longitud del segmento de línea de universo B1-TB2. El

reloj de la estación B realiza la medida, pero no puede hacerla sin el concurso del reloj de la estación A, que proporciona el dato de lo que marcaba cuando la máquina pasó por allí. El resultado es $\Delta t_{0\text{B1-TB2}} = 35$ segundos. La medida del reloj de la estación B es distinta de la del reloj de la máquina porque uno mide una cosa y el otro mide otra.

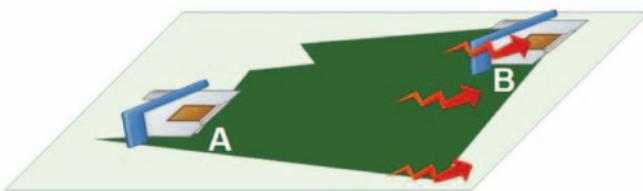
La relación (1) queda ahora $\Delta t_{0\text{B1-TB2}} = \gamma \cdot \Delta t_{0\text{TA1-TB2}}$ con $\gamma = 1 / (1 - 0,7^2 c^2/c^2)^{1/2}$, y se interpreta como una relación entre dos duraciones o dos tiempos propios, uno de los cuales, $\Delta t_{0\text{B1-TB2}}$, es proyección del otro en el SR de las estaciones.

En la geometría del espaciotiempo no es el coseno circular sino el hiperbólico, dado por γ , 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, en el caso que analizamos, que en lo que mide el reloj de la estación B (la proyección) caben más tictacs, más unidades patrón, que en lo que mide el de la máquina (lo proyectado). Por eso, cuando el tren llega a B, el reloj de la estación marca más que el de la máquina.

No hace falta, en esta interpretación, acudir a tiempos que pasan más deprisa o más despacio, ni a relojes que cambian su marcha [1]. El reloj de la máquina del tren y los de las estaciones, como buenos patrones, mantienen sus ritmos. Si están sincronizados cuando el tren pasa por A y no lo están cuando el tren llega a B es, simplemente, porque midieron cosas distintas.

Experiencia real de la detección de muones procedentes de los rayos cósmicos

Prueba clásica de la TRE es el experimento de detección, a distintas alturas sobre el nivel del mar, de los muones que se producen por colisiones de rayos cósmicos con núcleos atómicos en capas altas de la atmósfera. Algunos, al producirse, resultan dirigidos verticalmente hacia la superficie terrestre, con velocidades muy cercanas a la de la luz.



Juan Tomé
www.cosmologica.amonaria.com

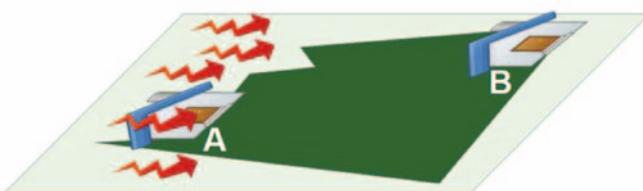


Figura 2

En una versión de este experimento [2] se detectan muones en dos laboratorios, uno en la montaña, el A, y otro casi

al nivel del mar, el B. La Figura 2 representa dos planos de simultaneidad en el SR de los laboratorios, el de encima posterior al de debajo. Como muestra la figura, no todos los muones que pasan por el laboratorio A llegan al B. El 25 % aproximadamente se desintegra espontáneamente por el camino. La vida media de los muones es $2,2 \cdot 10^{-6}$ segundos y el período de semidesintegración de una población es $1,5 \cdot 10^{-6}$ segundos. Como solo el 25 % de los muones que pasan por el laboratorio de la montaña se desintegra antes de llegar al nivel del mar, debe ser porque la duración de su viaje es menor que $1,5 \cdot 10^{-6}$ segundos. Pero si se divide la distancia que recorren los muones por su velocidad, se obtiene que tardarían $6,4 \cdot 10^{-6}$ segundos, los que cuentan los relojes de los laboratorios entre el paso de los muones por el A y la llegada al B. La experiencia es una prueba de la TRE porque la explicación clásica no es posible: nada que viva $2,2 \cdot 10^{-6}$ segundos puede hacer un viaje que dure $6,4 \cdot 10^{-6}$ segundos.

La explicación relativista habitual se hace en términos de "dilatación temporal": para observadores de los laboratorios, la vida media de los muones se dilata, se multiplica y veces, lo que hace posible que los muones puedan así llegar desde un laboratorio al otro.

Desde el punto de vista del universo de procesos, en la experiencia se comparan las duraciones de dos procesos distintos y oblicuos. Uno es el "viaje de muones entre A1 y B2", que conecta el sitiomomento "detección de muones en el laboratorio A" con el sitiomomento "detección de muones en el laboratorio B". Ese proceso se representa en la Figura 3 mediante la línea de universo verde A1-B2. El otro proceso es el "laboratorio B entre B1 y B2", que conecta el sitiomomento B1, simultáneo a "detección de muones en el laboratorio A", y el sitiomomento "detección de muones en el laboratorio B". Se representa por la línea de universo roja B1-B2.

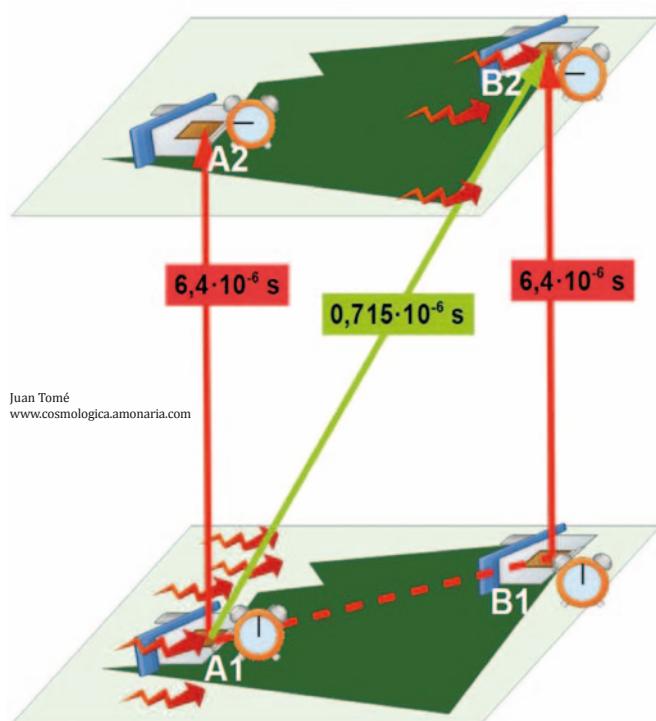


Figura 3

La duración del proceso "laboratorio B entre B1 y B2", $\Delta t_{0\text{ B1-B2}}$, la mide el reloj del laboratorio B con el concurso del reloj del A, resultando $6,4 \cdot 10^{-6}$ segundos. La duración del proceso "viaje de muones entre A1 y B2", $\Delta t_{0\text{ A1-B2}}$, se mide usando el proceso "desintegración de muones" como patrón, como reloj estadístico que da la duración del viaje en términos de la fracción de muones que llega a B. Por ejemplo, tal duración sería $1,5 \cdot 10^{-6}$ segundos si llegara la mitad. Pero en la experiencia real que se está describiendo llegaron a B el 72,47 % de los muones, así que el viaje tuvo que durar menos. Su duración exacta se puede calcular a partir de la ley de la desintegración, $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$, porque se conocen $\tau = 2,2 \cdot 10^{-6}$ segundos, vida media de los muones, y $N(t)/N_0 = 0,7247$, la fracción de muones llegados a B que se determinó experimentalmente. Resulta que el viaje de los muones duró $0,715 \cdot 10^{-6}$ segundos.

La relación (1) queda ahora $\Delta t_{0\text{ B1-B2}} = \gamma \cdot \Delta t_{0\text{ A1-B2}}$, y se interpreta, de nuevo, como una relación entre dos duraciones o dos tiempos propios: uno, el del proceso "viaje de muones entre A1 y B2"; otro, el del proceso "laboratorio B entre B1 y B2", siendo éste proyección del otro en el SR de los laboratorios. La proyección, $6,4 \cdot 10^{-6}$ segundos, vuelve a ser mayor que lo proyectado, $0,715 \cdot 10^{-6}$ segundos. El factor γ es ahora muy grande, porque los muones alcanzan el 99,2 % de la velocidad de la luz, y la duración del proceso medido en el laboratorio B es casi nueve veces la del viaje de los muones. Esa es la espectacular diferencia entre las duraciones de dos procesos que empiezan y terminan a la vez en el SR de los laboratorios. Y no es una diferencia imaginada, como la del tren y las estaciones. Es experimental, absolutamente real.

La explicación no recurre a dilataciones del tiempo entre tic y tac de relojes en movimiento, que a eso equivaldría hablar de 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. Como para el reloj del tren y los de las estaciones, la explicación supone que el "reloj muon" mantiene su ritmo.

Comentarios finales

La "dilatación temporal" es un caso particular del fenómeno general de desincronización de relojes, sean reales, como los de las redes TAI o GPS, o imaginados, como los de la paradoja de los gemelos. Explicaciones como las presentadas para los dos casos tratados aquí podrían aplicarse a otros fenómenos de desincronización. Las explicaciones de ese tipo tienen rasgos de los que convendría la discusión crítica para delimitar su posible utilidad en la divulgación o en la introducción de la TRE:

1. Se basan en la consideración de los relojes como procesos patrón que se comparan con otros para medirlos. Al entenderlos así, se reconoce que todas las medidas de reloj, sin excepción, son medidas de duraciones propias de procesos; o si se prefiere el lenguaje más habitual, que todas las medidas de reloj, sin excepción, son medidas de tiempos propios.
2. Se apoyan en la bien conocida analogía entre medidas de tiempos propios a lo largo de líneas de universo y medidas de longitudes a lo largo de caminos en el espacio [3]. Para medir la longitud de un camino se usa una cinta

métrica, un objeto pautado por repeticiones, que debe tenderse a lo largo del camino siguiendo todas sus revueltas; del mismo modo, para medir la duración de un proceso se usa un reloj, un proceso pautado por repeticiones, que debe seguir todas las vicisitudes del proceso.

3. Señalan que la desincronización se produce porque los relojes miden duraciones de procesos distintos, de forma que la explicación de cada caso se fundamenta en la identificación precisa de los procesos implicados y de las líneas de universo que siguen los relojes que se desincronizan.
4. Ponen el foco en el aspecto clave de las desincronizaciones: la asimetría de las líneas de universo de los procesos cuyas duraciones se comparan. En los casos analizados en este artículo, la asimetría es la inherente a la relación de proyección: si en algún SR un segmento de línea de universo es proyección de otro, no existe SR en el que el otro sea proyección del uno. Cuando en el contexto de la TRE se comparan duraciones de procesos que comparten los sitios-momentos extremos (caso de la paradoja de los gemelos) la asimetría es muy visual, lo que facilita la explicación básica de esas desincronizaciones. Pero cuando entran en escena el campo gravitatorio y la consecuente curvatura de las regiones del espaciotiempo en las que se trazan las líneas de universo comparadas, la intuición gráfica relativista no basta. La referencia [4] es ilustrativa al respecto.
5. Hacen posible subrayar el carácter absoluto de las desincronizaciones experimentadas, asociado al carácter absoluto de la asimetría. El Principio de Relatividad no resulta contradicho, porque no requiere simetría, sino reciprocidad: si en un SR se observa una desincroniza-

ción absoluta asociada a una asimetría de líneas de universo, desde otro SR se observará la desincronización correspondiente, también absoluta y también asociada a la asimetría de las líneas de universo.

6. Aceptan la proposición, que tiene necesariamente el carácter de hipótesis, de que los relojes, como buenos patrones de medida, deben mantener sus ritmos con independencia de su movimiento o reposo relativos [5]. Lo que se acepta es que no cambia la duración del proceso patrón que repiten, en coherencia con el carácter absoluto de la duración y del tiempo propio, así como con la invariancia del intervalo espaciotemporal. Compatibilizar el mantenimiento del ritmo de los relojes y la realidad de sus desincronizaciones es posible porque al entender que los relojes son procesos patrón, se entiende también que no miden el tiempo relativo abstracto, sino duraciones de procesos concretos. Eso permite que las explicaciones de los fenómenos de desincronización no tengan que referirse a relojes que adelantan o atrasan al medir tiempos que pasan con más o menos rapidez.

Referencias

- [1] A. SAZANOV, *El universo tetradimensional de Minkowski* (Mir, Moscú, 1990, p. 221- 226).
- [2] J. SMITH, *Introducción a la relatividad especial* (Reverté, Barcelona 1969, p. 54-57).
- [3] E. TAYLOR y J. WHEELER, *Spacetime Physics-Second Edition* (Freeman, Nueva York, 1992, p. 147-152).
- [4] I. MARTÍ, "La paradoja de los trillizos grávidos", *REF*, 30, 1, 2016, 13-16.
- [5] <http://www.amonaria.com/wordpress/wp-content/uploads/2019/11/Los-relojes-deben-mantener-su-ritmo.pdf>

¿te gusta investigar?

ATI
La solución adecuada a cada instalación

Suministro de equipamiento para investigación

* alimentación HV-LV * racks * electrónica de control y adquisición * espectroscopía * detectores (silicio, HPGe, centelleadores, Cd/Zn/Te...) * cables y accesorios * gestión de adquisiciones

info@atisistemas.com