

eISSN: 1989-3612

DOI: <https://doi.org/10.14201/art2024.31735>

UNIVERSO DE PROCESOS: REALIDAD FÍSICA CAMBIANTE Y CUADRIDIMENSIONAL

Universe of processes: changing and four-dimensional physical reality

Juan TOMÉ

Catedrático ES JuntaEx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1910-3945>

Recibido: 25/10/2024

Revisado: 23/01/2024

Aceptado: 26/02/2024

RESUMEN: Este trabajo defiende que una concepción de la realidad física como *universo de procesos* ofrece un marco adecuado para construir interpretaciones clarificadoras de fenómenos relativistas como la «dilatación temporal» y la «contracción de longitudes». Pretende además mostrar que la realidad física así concebida es, sin contradicciones, intrínsecamente cambiante y cuatridimensional. Por último, señala algunos rasgos de esa concepción que podrían tener interés en debates filosóficos que trascienden el marco al que este trabajo se restringe: el de lo relacionado con los fenómenos cinemáticos relativistas.

Palabras clave: relatividad, espaciotiempo, dilatación temporal, paradoja de los gemelos, contracción de longitudes.

ABSTRACT: This paper argues that a conception of physical reality as a *universe of processes* offers an adequate framework to construct clarifying interpretations of relativistic phenomena such as «time dilation» and «length contraction». It further aims to show that physical reality thus conceived is, without contradiction, intrinsically changing and four-dimensional. Finally, it points out some features of this conception that

could be of interest in philosophical debates that go beyond the framework to which this work is restricted: that of what is related to relativistic kinematic phenomena.

Keywords: relativity, spacetime, time dilation, twins paradox, length contraction.

1. INTRODUCCIÓN

La Teoría de la Relatividad (TR) cumple ya más de 100 años y tiene aplicaciones de uso general y cotidiano: la localización por satélite (GPS y otras) o la fijación del Tiempo Universal Coordinado por ejemplo. El correcto funcionamiento de esas aplicaciones extiende la base de sustentación de la teoría mucho más allá de los experimentos que han ido confirmando en todos sus detalles, de forma que su aceptación es general. Sin embargo, todavía se encuentran, en el campo de la física, diferentes interpretaciones de los fenómenos relativistas y del significado de las magnitudes asociadas. También hay diferencias, en el campo de la filosofía de la ciencia, acerca de las consecuencias que la TR tiene sobre la ontología del espacio, el tiempo o el espaciotiempo.

Este es un trabajo de divulgación científica sobre Relatividad, porque su objetivo principal es presentar una concepción de la realidad física que permite una interpretación clarificadora de los fenómenos cinemáticos de la Teoría de la Relatividad Especial (TRE): los llamados «dilatación temporal» y «contracción de longitudes». Sin embargo, en cuanto la concepción de realidad física que se presenta toma los *procesos*¹ como realidades primarias y conduce a establecer en términos de procesos qué son los relojes, qué miden y cuál es el significado de sus medidas, el trabajo se acerca, siempre desde el lado de la física, a territorios de la filosofía de la ciencia que le son fronterizos.

El trabajo tiene tres partes. La primera (Secciones 2 y 3) contiene una reflexión crítica sobre las explicaciones comunes de los fenómenos relativistas de «dilatación temporal» y de «contracción de longitudes» y sobre las dificultades que los no especialistas encuentran para aceptarlas. Tal reflexión conduce a señalar que la causa principal de esas dificultades sería que la concepción común de la realidad física y el lenguaje asociado

1. Las palabras y expresiones que tienen significado específico en este trabajo aparecen en cursivas la primera vez que aparecen.

separan las tres dimensiones espaciales de la temporal, por lo que son inapropiados para describir y explicar los fenómenos relativistas, que son intrínsecamente cuadrimensionales. La comprensión de los fenómenos relativistas requeriría entonces disponer de una concepción de la realidad física que sea intrínsecamente cuadrimensional y que use lenguaje y representaciones que no contradigan lo que tratan de describir y explicar.

La segunda parte constituye el núcleo del trabajo. Empieza presentando una concepción de la realidad física que satisface los requerimientos que el análisis de la primera parte determina: ser intrínsecamente cuadrimensional y usar lenguaje y representaciones consistentes. Luego va mostrando cómo se pueden explicar e interpretar, en ese marco conceptual, los fenómenos relativistas de «dilatación temporal» y de «contracción de longitudes». Con más detalle, esta segunda parte del trabajo avanza dando los siguientes pasos:

1. En las secciones 4 y 5 se describe la evidencia del cambio sin referirlo a estados de sistemas materiales y se considera que los procesos, sucesiones de cambios concatenados, son los componentes básicos, primarios, de la realidad física. Esta realidad, considerada en conjunto, sería una maraña de procesos interrelacionados, cada uno con su propia dirección cuadrimensional de cambio, resultante de las interacciones con otros. La realidad física así entendida puede llamarse *universo de procesos*, y es, sin contradicciones, intrínsecamente cambiante y cuadrimensional.
2. En la sección 6 se establecen las siguientes correspondencias entre entidades físicas y geométricas:
 - a) Cambio (suceso, hecho) ↔ *sitiomomento* (punto del espacio-tiempo)
 - b) Proceso simple ↔ línea de universo
 - c) Proceso complejo (colección de procesos simples casi paralelos) ↔ hoja, tubo de universo
 - d) Universo de procesos ↔ espaciotiempo
3. En la sección 7 se define qué son los relojes y se precisa el significado de sus medidas al margen de la idea de tiempo. En concreto, se establece que:
 - a) Los relojes no son artilugios; son procesos naturales que se repiten o procesos que distintos artilugios son capaces de repetir.
 - b) Las medidas con relojes, como todas, tienen que ser comparación de entidades semejantes. Si los relojes son procesos, las

medidas con relojes tienen que ser comparaciones de procesos. Los relojes son los procesos patrón en esas comparaciones.

- c) El resultado de tales medidas tiene que ser una magnitud física propia de los procesos que se comparan con el proceso reloj. Tal magnitud es la *duración* del proceso medido, algo muy concreto, muy distinto del tiempo abstracto.
 - d) La duración de los procesos puede identificarse con el «tiempo propio» relativista y asociarse con la longitud cuadrdimensional de las líneas de universo en el espaciotiempo. Eso la señala como la magnitud física que estructura geoméricamente el espaciotiempo.
4. En la sección 8 se pone de manifiesto que las experiencias de desincronización de relojes (que suelen explicarse en términos de «dilatación del tiempo», de «tiempos que pasan» más deprisa o más despacio o de relojes que atrasan o adelantan) tienen una explicación alternativa en el marco del universo de procesos. Tal explicación prescinde de «tiempo» (idea y palabra), acepta la hipótesis de que los relojes mantienen sus ritmos durante tales experiencias, y señala que la desincronización resulta de comparar lo que marcan relojes que miden cosas distintas.
 5. En las secciones 9 y 10 se explica que las entidades espaciales («objetos», «presentes») no son realidades físicas, sino cortes tridimensionales de realidades cuadrdimensionales, que los «objetos» son cortes de procesos complejos y que los fenómenos relativistas de «contracción de longitudes» resultan de comparar medidas de longitud de distintos cortes del mismo proceso.
 6. En la sección 11 se interpreta el movimiento relativo como percepción tridimensional sucesiva de la oblicuidad cuadrdimensional de dos procesos, oblicuidad que se manifiesta como distancia espacial cambiante entre ellos.

La tercera parte (Sección 12) complementa el contenido del trabajo con algunos apuntes sobre temas de filosofía de la ciencia relacionados con él. Aunque quedan fuera del alcance propiamente científico del trabajo, podrían servir para contrastar con otras la concepción de la realidad física presentada. Sucesivas subsecciones tratan brevemente sobre evolución y cuadrdimensionalidad, sobre cuadrdimensionalidad y dinamismo, sobre procesos y presentes, sobre cambio y realidad, sobre procesos y espaciotiempo, y sobre cambio y reversibilidad.

2. EL PUNTO DE PARTIDA

Cuando alguien interesado en comprender la Teoría de la Relatividad Especial (TRE) lee trabajos de introducción o divulgación, se encontrará con frases como «los relojes en movimiento atrasan» o «los objetos se acortan en la dirección del movimiento». Y en sus intentos de comprenderlas, es posible que llegue a situaciones que le induzcan a preguntarse si atrasan realmente esos relojes o si se acortan realmente esos objetos. Si lee, por ejemplo, en relación con dos trenes que se cruzan, que para los observadores del tren A los relojes del tren B atrasan, y a continuación, ilustrando el postulado de relatividad, se encuentra con que para los observadores del tren B son los relojes del A los que atrasan, es muy razonable que se pregunte: pero ¿cómo van a atrasar, realmente, los relojes de los dos trenes? Y cuando lea que el tren B se acorta para los observadores del A y que el A se acorta para los del B, se encontrará en una situación de perplejidad parecida y se sorprenderá pensando: ¿cómo es posible que se acorten realmente los dos trenes?

Para los especialistas no hay perplejidad, porque tienen claro el significado preciso de «realmente» en esas frases: la realidad es lo que reflejan las medidas de longitud y las medidas de los relojes en un Sistema de Referencia (SR) dado. Y no hay contradicciones entre las medidas de distintos SR porque, a causa de la relatividad de la simultaneidad, las medidas realizadas en un sistema no son las mismas que las realizadas en el otro. Además de la realidad de las medidas, son reales las consecuencias asociadas. Por ejemplo: son muy reales las longitudes de los recorridos en los aceleradores de partículas y muy real que las partículas los completan; también es entonces muy real que se «dilata la vida» de las partículas en movimiento y que para ellas se «contrae la longitud del recorrido», porque si no fuera así no vivirían lo suficiente para alcanzar los blancos contra los que chocan.

Taylor y Wheeler se ponen en la piel de los neófitos perplejos y enfrentan la pregunta: ¿atrasan realmente los relojes en movimiento? Para contestar, la reformulan en otras dos: una, “¿están realmente verificadas mediante experimentos las diferencias entre frecuencias de relojes?”; y otra, “¿cambia algo realmente en un reloj cuando se mueve, de lo que resulte el cambio observado en la frecuencia de tictac?” (Taylor y Wheeler, 1992, 76-77). A la primera contestan rotundamente que sí, apoyándose en las medidas de vidas de partículas en aceleradores. Y a la segunda rotundamente que no, porque, de lo contrario, habría que admitir que cada vez que una persona, a capricho, alterara su movimiento, se vería afectado el funcionamiento de todos los relojes cuyos movimientos respecto a la persona quedaran, por ese capricho, alterados. Aunque Taylor y Wheeler

hacen ver que las dos respuestas muestran caras distintas de la misma pregunta inicial, y que no hay contradicción entre ellas si se piensa espaciotemporalmente, es posible que la perplejidad de los neófitos siga viva y les lleve a cuestionarse ahora: ¿cómo atrasa un reloj sin que se altere su funcionamiento?, y quizás también, por analogía: ¿cómo se contrae algo si no se altera su estructura, si no disminuyen sus distancias internas?

Debiera entenderse, en mi opinión, que quienes persisten en preguntar acerca de la realidad de la «dilatación temporal» y de la «contracción de longitudes» están manifestando, sin explicitarlo, que esos fenómenos no encajan en su concepción del mundo, y están pidiendo, además, también sin explicitarlo, que se les muestre la concepción alternativa en la que deben encajarlos a fin de encontrar respuestas satisfactorias a las preguntas formuladas. ¿En qué concepción del mundo es posible que un reloj atrase sin que cambie su ritmo? ¿En qué realidad física es posible que algo se contraiga sin que se altere su estructura interna? El punto de partida de este trabajo es aceptar la pertinencia de esas preguntas y considerar que el intento de contestarlas es una magnífica oportunidad de caracterizar el tipo de realidad física que es consistente con la revolución conceptual que la TRE supuso.

3. LA TRE Y EL CAMBIO DE CONCEPCIÓN DE LA REALIDAD FÍSICA

La concepción común de la realidad física, la que adquirimos por experiencia propia, se basa en la idea de objeto que puede cambiar de aspecto, de forma y de posición respecto de nosotros. Además de fuertes componentes culturales, tiene también un soporte biológico que resulta del desarrollo del cerebro y de sus funciones a lo largo de la evolución animal. Jerison (1973) estudió la evolución de los mundos perceptuales de los vertebrados, esto es, de los modelos que sus cerebros construyen para interpretar la información sensorial que reciben del entorno. Sostuvo la hipótesis de que el mundo perceptual de los mamíferos resulta de la integración de enormes colecciones de datos (recibidos de distintos lugares y en distintos momentos, sobre todo por vía auditiva y visual) en las unidades interpretativas que llamamos objetos, a las que se otorga (inconscientemente, claro está) la cualidad de subyacer a las percepciones de los cambios sucesivos. Según eso, la concepción común de la realidad física compartiría lo esencial con el mundo perceptual de los mamíferos. Por otra parte, el modelo de la física clásica se corresponde con la concepción común: la realidad física se describe en términos de un espacio de tres dimensiones estructurado a partir de objetos y de una dimensión

más, la del tiempo, esencialmente distinta de las espaciales y en la que se suceden los cambios de los objetos.

La TRE alteró radicalmente esa concepción al reconocer que las tres dimensiones espaciales y la temporal están inseparable y profundamente imbricadas en un continuo cuadridimensional. La aportación fundamental de la TRE no es la cuadridimensionalidad (la realidad de la física clásica ya lo era) sino la afirmación de que espacio y tiempo dejan de ser independientes para integrarse en el espaciotiempo, lo que tiene como consecuencia inmediata que «objeto tridimensional» y «tiempo unidimensional» dejen de tener sentido por separado. Szamosi (1986) hace ver que la TR quiebra los fundamentos del mundo perceptual de los mamíferos. Aceptarla es difícil. Requiere renunciar a concepciones personales profundamente arraigadas porque son intuitivas, porque resultan de la evolución biológica de los sistemas de percepción, porque las compartimos todas las personas y porque son necesarias, útiles y exitosas para la interpretación de los fenómenos de nuestro entorno.

La tarea de presentar una concepción de la realidad física que sea consistente con la TRE y que se muestre como alternativa a la concepción común, debe hacerse usando lenguaje y representaciones que no contradigan lo que tratan de describir y explicar, que no induzcan a recaer en el pensamiento clásico, que no tiren piedras contra el tejado de lo que se intenta construir. El lenguaje común, que separa espacio y tiempo por razones originarias (nace en el mundo perceptual de los mamíferos), y las representaciones de objetos que cambian de posición a medida que pasa el tiempo son útiles para la descripción de la realidad clásica, pero conducen a incoherencias inevitables y a comprensiones insatisfactorias cuando se trata de fenómenos relativistas. Valga como ejemplo que se denominen «dilatación temporal» y «contracción de longitudes» los dos fenómenos relativistas que esperan a quienes cruzan el umbral de las introducciones a la TRE, tanto en contextos de formación científica, de divulgación general o de aproximación filosófica. Pues bien, esas denominaciones hacen pensar que la «dilatación temporal» es cosa del tiempo y que la «contracción de longitudes» es cosa de los objetos, quedando así desvirtuado, desde el primer momento y por obra y poder del lenguaje, el carácter cuadridimensional intrínseco e inseparable de la realidad física, el que la TRE afirma y que esos fenómenos prueban.

Por eso, si se asume con todas sus consecuencias la cuadridimensionalidad inseparable de lo real, las descripciones, explicaciones e interpretaciones de los fenómenos relativistas, así como las posibles argumentaciones posteriores derivadas, deberían, por razones de coherencia, prescindir de los dos elementos disjuntos fundamentales de la

descripción clásica («objeto tridimensional» y «tiempo unidimensional»), y sustituirlos por un solo elemento cuatridimensional que los integrara: el proceso. En este trabajo se muestra que los procesos pueden ser los elementos básicos de la descripción de los fenómenos relativistas y de la realidad física misma, que dejaría de entenderse como universo de objetos que cambian en el tiempo para empezar a entenderse como universo de procesos.

4. PROCESOS

No hay permanencia en el universo, todo se transforma sin cesar, aunque, a veces, la prueba del cambio necesite estudios muy minuciosos. Cambiamos cuando respiramos, caminamos, percibimos, leemos, pensamos, cuando nos sentimos nosotros mismos; cambian los individuos de cualquier especie al realizar cualquiera de las funciones que les son propias, al seguir viviendo; cambia el paisaje, cambian los suelos, las montañas, cambian hasta las rocas, el planeta entero, por dentro y por fuera; ni la Tierra ni ningún planeta permanece, ni las estrellas ni las galaxias permanecen; ni siquiera el universo como un todo se mantiene igual a sí mismo, porque cambia la escala de su geometría interna, se expande, lo que se traduce en cambios de temperatura, densidad y composición que no han cesado desde el big bang, el cambio originario. El nuestro es un universo cambiante y a medida que deje de serlo será un universo muerto.

Pero los cambios no son sucesos caóticos o caprichosos, ni se presentan en grupos inconexos con los rasgos de lo casual. Antes bien, pueden ser reconocidos como eslabones de cadenas en las que se descubren reglas, pautas, que les dan consistencia, entidad. Se llaman aquí procesos a esas cadenas, a esas colecciones de cambios que pueden ordenarse en sucesión mediante explicaciones causales o de desarrollo organizado, de acuerdo con leyes científicas.

Todos los fenómenos pueden ser entendidos como procesos. Puede decirse que no hay seres, cosas, objetos, que sólo hay procesos. Nosotros mismos, más que «seres vivos» somos «procesos estar viviendo». Blank y Cerejido afirman:

En realidad, nadie encontró jamás una "cosa" estable en el Universo. En general llamamos "cosa" a una configuración de procesos cuyas escalas temporales nos resultan demasiado lentas. [...] Las cosas no son más que momentos de los procesos, en particular los momentos en que los

cambios son despreciables y la identidad del objeto se preserva (Blank y Cerejido, 1988, 27-28).

Y Rovelli señala que es el punto de vista compatible con la TR:

Concebir el mundo como un conjunto de eventos, de procesos, es el modo que mejor nos permite captarlo, comprenderlo, describirlo. Es el único modo compatible con la relatividad. El mundo no es un conjunto de cosas, es un conjunto de eventos. (Rovelli, 2018, 76-77)

En este trabajo, en todo lo que sigue, se consideran los procesos en su aspecto físico fundamental, esto es, en cuanto son susceptibles de medidas de duración. Los procesos físicos, químicos, biológicos, geológicos, astrofísicos o cosmológicos pueden contemplarse desde ese punto de vista, desde los más fugaces a los más persistentes. Al fin y al cabo, como se establece más adelante, la diferencia de duración es simple resultado de comparación mutua. Es razonable entonces, desde el punto de vista físico, considerar que los procesos son las entidades básicas para la descripción de la realidad y entender que el universo es un universo de procesos.

5. UNIVERSO DE PROCESOS

El cambio es ubicuo e incesante y se ordena en procesos. Cualquier hecho puede interpretarse como parte de un proceso que interacciona con otros. Ningún proceso se desarrolla al margen de los demás. Al contrario, se puede decir que los procesos se sostienen mutuamente, formando un entramado universal. El relieve, a gran y pequeña escala, la forma de los continentes y de la distribución de agua y tierra seca, la composición de la atmósfera, el clima global, todas esas propiedades cambiantes de la Tierra, se explican como procesos que encajan en la idea de planeta como como proceso geológico. Cada individuo, cada especie, cada ecosistema, todas esas unidades cambiantes, se pueden explicar cómo procesos bien encajados en la idea de la vida en la Tierra como proceso biológico planetario. Los grupos humanos, las ciudades, las naciones, los imperios o las civilizaciones, esas estructuras que aparecen, cambian y desaparecen, se explican como procesos que encajan en la idea de cultura humana como proceso social. El sistema solar es un proceso y la historia de la Tierra cabe en la suya. La historia del Sol, en particular, es determinante para la historia de la Tierra. Las estrellas y sus sistemas planetarios, las galaxias, todos los objetos celestes que cambian sin cesar bajo su apariencia inmutable, se explican como procesos que forman parte del universo descrito por las

cosmologías evolutivas. El universo sería la totalidad de los cambios concatenados en procesos de distinto rango, ligados de manera que el conjunto parece autoembridado. Es el proceso marco para los demás. Nosotros, como procesos, encajamos en el conjunto y estamos sostenidos por él.

La idea de universo como sistema de procesos se encuentra en Zubiri:

El universo en cuanto tal, el mundo en cuanto tal, no es un conjunto de cosas sometidas a cambio, sino un sistema procesual en cuanto sistema. Es formalmente y estructuralmente procesual, porque en él van surgiendo, en su lugar y a su hora, las cosas dotadas de una estructura, de una función y de un rango preciso (Zubiri, 2010, 90).

La interacción física entre procesos requiere su oblicuidad relativa. Si todos los procesos fueran paralelos no habría conexiones posibles entre ellos porque las conexiones también son procesos. El requerimiento de oblicuidad conlleva la multiplicidad de direcciones de los procesos, esto es, la multiplicidad de las posibles direcciones de cambio. Debe reconocerse que no hay razón alguna para suponer (como se hace implícitamente en la concepción clásica de la realidad física) que todos los procesos son paralelos, que todos los cambios se producen en la misma dirección, la que conduce del pasado al futuro del tiempo absoluto. Lo razonable es aceptar que cada cambio pueda seguirse de otros en cualquiera de las direcciones compatibles con la condición de conexión causal. Esta idea es fundamental para la comprensión del significado de las medidas de relojes (que adquieren, por eso, carácter direccional) y, por tanto, de los fenómenos cinemáticos de la TRE. Por otra parte, la idea de multiplicidad de las direcciones de cambio está en la raíz de la cuadridentalidad inseparable de los aspectos espaciales y temporales de la realidad física. Por eso puede decirse que la concepción del universo de procesos, además de ser intrínsecamente cambiante, es intrínsecamente cuadridental.

6. UNIVERSO DE PROCESOS Y SU CORRELATO FORMAL: EL ESPACIOTIEMPO

Una cosa es la realidad física y otra su representación. El universo de procesos, los procesos que lo constituyen y cada uno de los cambios que en ellos se concatenan son realidades físicas. Sus correlatos formales son, respectivamente, el espaciotiempo, las líneas de universo y cada uno de los puntos del espaciotiempo.

Los diagramas de Minkowski son las representaciones habituales del espaciotiempo. Los elementos básicos de estos diagramas (puntos del espaciotiempo y líneas de universo) se relacionan sin dificultad con las realidades físicas del universo de procesos. Cada punto del espaciotiempo se corresponde con un cambio, un suceso en el lenguaje habitual. Se resalta su carácter cuatridimensional llamándolos sitiomomentos. Las líneas de universo representan procesos simples, partículas elementales, por ejemplo. Los procesos complejos, haces de procesos simples casi paralelos ligados entre sí, se representan mediante hojas de universo si se considera solo una dimensión espacial en el diagrama, o mediante tubos de universo si se consideran dos. Hojas y tubos de universo son las regiones del espaciotiempo que reúnen todos los sitiomomentos de todas las líneas de universo de los procesos simples que componen un proceso complejo. El universo de procesos quedaría representado por una maraña de esas líneas, hojas y tubos, todos con direcciones comprendidas entre la vertical y la inclinada 45° , la de las líneas luz, porque los sitiomomentos de un proceso tienen que poder estar causalmente conectados y la velocidad de la luz es límite para la propagación de toda interacción.

Las distintas direcciones de líneas, hojas y tubos de universo corresponden a las distintas direcciones de cambio inherentes a los procesos que representan. Conviene subrayar que las direcciones de cambio no son direcciones espaciales sino espaciotemporales y que es ese entramado de direcciones, hecho realidad física por los procesos, el que materializa el continuo cuatridimensional en el que no tiene sentido separar lo espacial de lo temporal. El universo de procesos, esa maraña de procesos de todas las posibles direcciones de cambio, materializa el espaciotiempo.

7. LOS RELOJES Y EL SIGNIFICADO DE SUS MEDIDAS

Toda medida supone siempre una comparación, más o menos directa, de entidades homogéneas con el fin de cuantificar una propiedad física de las entidades comparadas. Entonces, al hacer medidas con relojes, ¿qué entidades se comparan?, ¿qué propiedad física de esas entidades es la que se cuantifica al hacerlas? Y otra pregunta que subyace a esas dos: ¿qué es un reloj? Parece necesario responderlas todas si se quiere dotar de significado físico preciso a las medidas que se hacen usando relojes. Sin embargo, no han sido suficientemente consideradas al tratar la TRE, aunque la crítica del tiempo es una de sus bases.

La inmensa mayoría de los instrumentos de medición necesitan interactuar con algo externo para que la medida y su resultado se produzcan. Termómetros, manómetros, balanzas, amperímetros, pehachímetros, cuentarrevoluciones, sismógrafos o fotómetros, responden a estímulos externos de distinto tipo, se equilibran, se ajustan o resuenan con ellos y así miden temperaturas, presiones, masas, intensidades de corrientes, concentraciones, velocidades de giro, vibraciones o luminosidades. Los relojes, a diferencia de todos ellos, no se alteran mientras miden. Solo las varas de medir y los patrones materiales de superficie o de volumen comparten con los relojes esa característica, y todos ellos tienen en común que sirven para medir magnitudes relacionadas con el sustrato profundo de la realidad física, con lo temporal y lo espacial. En la concepción clásica del mundo físico, la estructura de lo temporal es muy simple, y las varas de medir y los patrones de superficie o volumen, que sirven para contrastar las propiedades geométricas del espacio, tienen preeminencia sobre los relojes. Pero cuando la concepción del mundo físico cambia con la TR y los «objetos tridimensionales» y el «tiempo unidimensional» dejan de tener sentido por separado, los relojes pasan a ocupar el lugar preeminente, ahora se verá por qué.

Los relojes son instrumentos de medida singulares porque necesitan estar en marcha para serlo. Reconocer esto es de suma importancia, porque revela que lo esencial para que algo pueda servir como reloj es que pueda desarrollar un proceso. Los relojes son procesos. Un reloj de sol no es el gnomon y la plantilla de sombras; una clepsidra no es el recipiente agujereado, ni un reloj de arena es la doble ampollita que contiene el mármol molido y seco. Si no marchan, ni los relojes naturales, ni los mecánicos ni los electrónicos ni los atómicos son relojes. Los relojes son los procesos repetibles o repetidos que su diseño controla: la rotación de la Tierra, el vaciado (o el llenado) de un recipiente, la caída de mármol molido por una angostura, el vaivén de un péndulo, una oscilación piezoeléctrica o una transición energética en la corteza de átomos ¹³¹Cs.

A partir del reconocimiento de que los relojes son procesos repetibles, fluyen naturalmente las respuestas a las preguntas planteadas arriba:

1. Si los relojes son procesos, medir con relojes es comparar procesos. Tal comparación podrá ser más o menos directa, pero siempre existe
2. Los procesos reloj se repiten naturalmente (caso de la rotación de la Tierra) o artificialmente, sea de forma manual (caso de clepsidras y relojes de arena) o automática (caso de relojes mecánicos, electrónicos o atómicos). Por repetibles, son los procesos patrón en las comparacio-

nes en que consisten sus medidas. Los relojes que repiten automáticamente el proceso patrón son ritmos patrón.

3. La propiedad física que se cuantifica al medir con relojes tiene que serlo del proceso comparado con el reloj. Es su *duración*, magnitud dada por el número de veces que el proceso patrón cabe en él. La duración no es cantidad de tiempo abstracto, sino algo concreto que se predica del proceso comparado con el reloj.

Para realizar la medida directa de la duración de un proceso basta que un reloj lo acompañe, que siga todas sus vicisitudes. Por ejemplo, la duración de un vuelo tiene que ser medida por un reloj del avión; y las de un embarazo o de una jornada de trabajo tienen que ser medidas por relojes fijos a la embarazada o a quien trabaje, por ejemplo, a sus muñecas. De esta forma, el reloj se tiende junto al proceso con el que se compara (la línea de universo del reloj y la del proceso se superponen), y se pueden contar los tictacs que el reloj va dejando a lo largo del proceso, esto es, las veces que el proceso patrón cabe en él.

Realizar medidas directas de duración con relojes es análogo a medir longitudes de caminos con cintas métricas. Las cintas están pautadas por repetición de una longitud patrón. Los relojes están pautados por repetición de una duración patrón. Tender una cinta métrica a lo largo de todas las revueltas de un camino es análogo a que un reloj acompañe a un proceso en todas sus vicisitudes. Contar las veces que el metro cabe en el camino equivale a contar los tictacs del reloj que caben en el proceso al que acompaña.

Así, los relojes miden la longitud cuadridimensional de la línea de universo que representa al proceso medido. Por tanto, la duración puede identificarse con el «tiempo propio» relativista y relacionarse con el «intervalo», el invariante métrico de la geometría del espaciotiempo. Duración significa mucho más que cantidad de tiempo, entre otras cosas porque para comparar dos medidas de duración se necesita información sobre las direcciones espaciotemporales de los procesos medidos. Lo extraordinario es que una magnitud de significado tan profundo sea tan fácil de medir, se haya medido desde tan antiguo y se mida con la más humilde clepsidra o con el más sofisticado reloj atómico.

Resulta entonces que todas las medidas de reloj son medidas de «tiempos propios» (de duraciones propias de procesos concretos) y que todas son absolutas (todos los observadores coincidirán en asignar la misma duración al mismo proceso), en correspondencia con la invariancia del intervalo métrico relativista. La duración es una magnitud física fundamental. Reconocerlo justifica la elección de los procesos como

elementos básicos de la descripción de la realidad física y de las explicaciones de los fenómenos relativistas.

Minkowski (2012), en 1908, en la conferencia de Colonia donde presentó su concepción del espaciotiempo, definió el «tiempo propio» como cantidad puramente geométrica: longitud cuatridimensional de una línea de universo. Eddington, en 1920, le da significado físico:

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; [...] (Eddington, 1959, 71).

Ese significado ha permanecido en textos académicos y de divulgación. Pero tanto en la formulación de Eddington como en otras (“tiempo que sería medido por un reloj transportado a lo largo de la línea de universo” (Hartle, 2003, 60) o “intervalo temporal experimentado realmente por la partícula” (Penrose, 2011, 295), por ejemplo), el significado adolece de la ambigüedad que se deriva de referirse al tiempo para establecerlo. Es como si se definiera la longitud en términos de «intervalos de espacio» abstractos, sin referencia alguna a realidades materiales concretas, sin establecer previamente que las medidas de longitud suponen la comparación de objetos concretos con un objeto patrón: la vara de medir.

Esa ambigüedad se elimina cuando se identifica «tiempo propio» con duración de procesos, porque duración no es intervalo temporal abstracto sino propiedad de realidades físicas concretas. La identificación de «tiempo propio» con duración lo dota de significado físico pleno, más allá de su definición algebraica y de su significado geométrico. Tiene además varias consecuencias importantes:

1. Se precisa el significado de «propio». Mientras que al decir «tiempo propio» cabe preguntarse ¿de qué?, al decir «duración propia» no hay ambigüedad: la duración siempre es propia, propia de un proceso concreto.
2. Se evitan distinciones artificiosas entre «tiempo propio» y «tiempo impropio», o entre «tiempo propio» y «tiempo coordinado», que son frecuentes en textos sobre relatividad, tanto de carácter científico como filosófico, y que se usan para distinguir «tiempos» medidos por relojes en reposo o en movimiento. Como la distinción entre reposo y movimiento es sólo subjetiva, el significado físico de lo medido por relojes tiene que ser el mismo, tanto si están en movimiento como si no. Todos los relojes miden duraciones propias de algún proceso, aunque no siempre sea

evidente de cuál. Ese es el caso de los relojes que marcan el «tiempo coordinado» de los SR: miden duraciones de procesos, reales o imaginados, que transcurran en reposo en ese SR.

3. Se puede dar una explicación natural de la existencia de un límite superior de velocidades, al asociarlo con la existencia de un cero absoluto de duraciones. En los diagramas de Minkowski, las líneas luz, de intervalo métrico cero, separan las regiones del espaciotiempo que, para un sitio-momento dado, tienen conexión causal posible con él y las que no. En la concepción del universo de procesos, tales líneas representan procesos luz, de duración cero, y marcan el límite de las direcciones posibles de cambio a partir de un sitio-momento dado. Ese límite parece natural: no tiene sentido que haya procesos que duren menos que nada, que un reloj cuente menos que cero ticks. Existir en el universo de procesos es estar en proceso, esto es, formar parte de una sucesión de cambios duradera. Hay que cambiar para existir, pero en proceso, teniendo duración. No hay procesos de duración negativa, en correspondencia con que toda línea de universo es de intervalo métrico positivo y enhebra sitio-momentos entre los que es posible la conexión causal.

8. LA INTERPRETACIÓN DE LA «DILATACIÓN TEMPORAL»

Se observan fenómenos de «dilatación temporal» cuando dos relojes de calidad (capaces de mantener sus ritmos con una constancia extraordinaria) que empiezan a medir a la vez marcando lo mismo (sincronizados) terminan de medir a la vez marcando distinto (desincronizados). Ese es el hecho experimental desnudo, anterior a cualquier explicación. Por eso, para evitar que el nombre del fenómeno presuponga una de las explicaciones posibles, es mejor llamarlos fenómenos de desincronización de relojes que fenómenos de «dilatación temporal».

Si se asume con todas sus consecuencias el carácter cuadridimensional intrínseco e inseparable de la realidad física, son insatisfactorias las explicaciones en términos de relojes que atrasan o adelantan al medir tiempos que pasan más despacio o más deprisa. Por otra parte, la consideración de los relojes como patrones y el carácter absoluto de la duración hacen que sea razonable adoptar la hipótesis de que los ritmos de los relojes se mantienen mientras miden. Con esas premisas, ante el hecho de que dos relojes de calidad empiecen a medir a la vez marcando lo mismo y terminen de medir a la vez marcando distinto, lo más

inmediato es pensar que han estado midiendo cosas distintas. En la concepción de la realidad física como universo de procesos, lo que pasa en los fenómenos de desincronización de relojes es muy sencillo: relojes de calidad miden duraciones distintas de procesos distintos y por eso, como tiene que ser, se desincronizan.

Ahora bien, los dos procesos medidos eran de duraciones distintas, pero ¡empezaron y terminaron a la vez! ¿Es posible que dos procesos que empiezan y terminan a la vez no duren lo mismo? ¿Es posible que los dos relojes que los acompañan, empezando a medir cuando empiezan los procesos y terminando cuando terminan, marquen distinto al final si marcaban lo mismo al principio? ¿Es posible que los dos relojes hagan eso manteniendo ambos el ritmo de sus tictacs? La respuesta a todas esas preguntas es sí, si se contestan en el marco del universo de procesos.

Para admitir que procesos que empiezan y terminan a la vez pueden durar distinto hay que romper con la concepción clásica de la realidad, que supone que todos los procesos son de la misma dirección, la única posible para el cambio, la del «tiempo que pasa». En cuanto se acepta la multiplicidad de las direcciones de cambio y se prescinde del «tiempo que pasa», la dificultad puede superarse.

Un símil espacial puede ayudar. El suelo y el techo de una habitación son conjuntos de sitios de la misma altura. Si un móvil va del suelo al techo en vertical, su recorrido es más corto que el de otro que vaya del suelo al techo oblicuamente. Aunque los dos empiezan y terminan a la misma altura, no son igual de largos. Pues bien, decir que dos procesos empiezan y terminan a la vez significa que conectan conjuntos de sitio-momentos de la misma hora: digamos el conjunto de «hora suelo» y el conjunto de «hora techo». Todos los relojes del conjunto «hora suelo», el de principio de los procesos, marcan una cosa, todos lo mismo; y todos los del conjunto «hora techo», el de final de los procesos, marcan otra, todos lo mismo. Pero uno de los procesos puede conectar el conjunto «hora suelo» y el conjunto «hora techo» en una dirección y el otro en otra, de forma que sus longitudes cuadrídimensionales pueden ser distintas. En uno de ellos, en el más largo, el que más dura, cabrán más tictacs que en el otro, tictacs fielmente contados por relojes que mantienen sus ritmos. Si el símil ha ayudado, se podría ahora encajar la afirmación «dos procesos que empezaron y terminaron a las mismas horas no duraron lo mismo» con la misma naturalidad con la que aceptamos que «dos recorridos que empezaron y terminaron a las mismas alturas no fueron igual de largos». La diferencia de duración, que es lo que midieron los relojes y causó su desincronización, se debe, como la diferencia de longitudes

recorridas entre suelo y techo, a la diferente oblicuidad de dos procesos que conectaron sitiomomentos de la misma hora².

La paradoja de los gemelos es el arquetipo de los fenómenos de desincronización de relojes. Desde su primera formulación (Langevin, 1911) hasta mucho después, la paradoja de los gemelos fue una experiencia imaginaria muy útil para mostrar una de las consecuencias de la TRE que más directamente removía las concepciones clásicas sobre espacio y tiempo. Actualmente, la paradoja es un hecho experimental probado (no con gemelos, sino con relojes atómicos gemelos) y tiene una explicación clara. En el universo de procesos se describiría así: Dos «procesos humanos» gemelos se separan en un sitiomomento, A, cuando llevan durando lo mismo, y se juntan en otro, B, siguiendo entre A y B distintas vicisitudes, es decir, teniendo entre A y B distintas interacciones. En tal caso, lo normal es que no duren lo mismo, porque sus «caminos» espaciotemporales entre A y B serán de distinta longitud espaciotemporal. Dado que los ritmos vitales de los gemelos, como los de los relojes, se mantienen, en uno de los «caminos» espaciotemporales cabrán más latidos de corazón, más respiraciones, más ciclos sueño-vigilia, más renovaciones de sus células, más proceso «estar viviendo» que en el otro. Cuando se reencuentren en B serán de edades distintas. Esto se puede admitir sin extrañeza si se reconoce que no se trata de comparar velocidades de envejecimiento (relacionadas con ambiguas velocidades de paso del tiempo) sino fragmentos de distinta duración de dos procesos «estar viviendo» similares. Afirmar que entre separación y reencuentro los dos «procesos humanos» gemelos duran distinto no debiera causar más perplejidad que afirmar que entre dos ciudades, A y B, hay dos carreteras de distinta longitud. Las medidas de reloj, en lenguaje de Bondi (1980), son “camino-dependientes”, entendiendo «camino» en sentido espaciotemporal.

De todo lo anterior se sigue que la tarea de explicar fenómenos de desincronización de relojes consiste en mostrar, en cada caso, cuáles son los procesos cuya duración midió cada uno de los relojes que,

2. En la geometría euclídea, la que estructura el espacio tridimensional, la proyección de un segmento es menor que el segmento proyectado. Por eso, en el símil de los móviles que van del suelo al techo, el recorrido más corto es el vertical, el perpendicular a suelo y techo. Pero la geometría que estructura el espaciotiempo no es euclídea. En ella, la proyección de un segmento de línea de universo es mayor que el segmento proyectado. Por eso, el proceso de duración mayor es el que conecta «hora suelo» y «hora techo» perpendicularmente. Los oblicuos son de duración menor, hasta los de oblicuidad 45°, que son de duración cero. El símil espacial no puede recoger esta propiedad de la geometría del espaciotiempo.

manteniendo sus ritmos, se desincronizaron. En Tomé (2021; 2022) pueden verse explicaciones concretas de este tipo, referidas a los fenómenos clásicos de introducción a la TRE, explicaciones que no precisan mención alguna a relojes que adelantan o atrasan o a tiempos que pasan más deprisa o más despacio.

9. PROCESOS Y OBJETOS

La idea de objeto, algo tridimensional que permanece, no encaja en la concepción de la realidad física como universo de procesos, donde las entidades físicas tienen que ser cuadridimensionales y cambiantes. Un objeto es, ya se ha dicho, una abstracción de los cerebros de los mamíferos que sirve para interpretar la información sensorial recibida del entorno. Su éxito evolutivo es evidente, así que su utilidad es incontestable. Pero los fenómenos relativistas obligan a revisar esa abstracción. La adecuación de la idea de objeto a un entorno no relativista no se niega al reconocer las inconsistencias entre tal idea y las evidencias experimentales que sostienen la TRE, que no proceden de la información sensorial directa y de su tratamiento cerebral, y que son, por tanto, ajenas a la percepción cotidiana.

La idea de que las medidas de un objeto se refieren a distintos cortes espaciales, tridimensionales, de entidades cuadridimensionales se remonta a Minkowski. En el universo de procesos, los procesos complejos son las entidades cuadridimensionales cuyos cortes espaciales son los «objetos tridimensionales». Los cortes espaciales son cortes de simultaneidad, esto es, subconjuntos de sitiomomentos del proceso que tienen la misma hora según los relojes sincronizados de un SR. Como la sincronización de relojes depende del SR, de un mismo proceso puede haber multitud de «objetos», tantos como cortes espaciales posibles según los distintos criterios de simultaneidad. Los procesos complejos son realidades físicas cuadridimensionales absolutas: todos los observadores están de acuerdo en la sucesión de cambios que los constituyen, en su posible concatenación causal y en su duración. En cambio, los «objetos tridimensionales» son sólo entidades subjetivas de carácter formal. El hecho de que los sitiomomentos de un objeto no puedan tener conexión causal entre sí (los cortes de simultaneidad tienen siempre inclinaciones mayores de 45° en los diagramas de Minkowski) refuerza la idea de que los «objetos tridimensionales» no son realidades físicas.

10. LA INTERPRETACIÓN DE LA «CONTRACCIÓN DE LONGITUDES»

Todos los fenómenos de «contracción de longitudes» se explican como resultados de medidas de longitud de distintos cortes espaciales del mismo proceso: diferentes cortes espaciales tienen distintas medidas.

Por ejemplo, un tren es un proceso; y también lo es la vía que une las estaciones de donde sale y a donde llega, vía que supondremos rectilínea por simplicidad argumental. Ese «proceso tren» es único, y es único también el «proceso vía». Todos los observadores coincidirán en identificar el conjunto de sitiomomentos que los constituyen. Son realidades cuadrdimensionales absolutas. Pero hay muchos «objetos tren» tridimensionales de ese único «proceso tren», distintos entre sí, y muchos «objetos vía» tridimensionales de ese único «proceso vía», también distintos entre sí. Habrá tantos «objetos tren» y «objetos vía» como cortes de simultaneidad puedan darse a esos procesos (tantos como observadores posibles), y cada corte distinto tendrá una longitud asociada distinta.

Los «objetos tren» y los «objetos vía» son entidades subjetivas. No se puede decir que hay un tren tridimensional real ni una vía tridimensional real entre estaciones. La realidad no es tridimensional. Las realidades son el «proceso tren» y el «proceso vía», y son cuadrdimensionales. Se pueden hacer muchas medidas tridimensionales subjetivas distintas de las realidades cuadrdimensionales absolutas «proceso tren» y «proceso vía». No tiene nada de extraño que den resultados distintos.

De todo lo anterior se sigue que la tarea de explicar fenómenos de «contracción de longitudes» (y paradojas asociadas) consiste en mostrar, en cada caso, cuáles son los cortes espaciales cuyas longitudes se midieron. En Tomé (2022) pueden verse ejemplos concretos de explicaciones de este tipo, que dejan claro lo esencial de esos fenómenos: resultar de la comparación de longitudes de distintos «objetos» del mismo proceso.

11. LA INTERPRETACIÓN DEL MOVIMIENTO

Clásicamente, el movimiento se predica de los objetos y se define como cambio de posición espacial a lo largo del tiempo. Al entenderlo así, espacio y tiempo quedan separados, lo que es cuadrdimensionalmente insatisfactorio. En el universo de procesos, el movimiento relativo es la percepción tridimensional sucesiva (la que, como procesos, nos corresponde) de la oblicuidad cuadrdimensional de dos procesos, que se manifiesta como distancia espacial cambiante entre ellos.

El ángulo que forman las direcciones de dos procesos y la velocidad relativa que se manifiesta se relacionan fácilmente: mayor oblicuidad relativa se manifiesta en mayor velocidad relativa, y la existencia de un límite superior de velocidades se corresponde con la de un límite superior para el ángulo que pueden formar dos procesos. Aunque oblicuidad y velocidad relativa son equivalentes, es preferible pensar en oblicuidades que en velocidades, porque el ángulo entre las direcciones de cambio de dos procesos es intrínsecamente cuadridimensional, mientras que la velocidad relativa, definida en términos de «objetos», los dos móviles, y del «tiempo que pasa», no cumple con el objetivo de usar un lenguaje libre de connotaciones clásicas.

Pensar el movimiento como manifestación de la oblicuidad de dos procesos y adoptar el lenguaje estrictamente cuadridimensional del universo de procesos arroja luz sobre algunas paradojas clásicas no relativistas. Por ejemplo, si se piensa que Aquiles y la tortuga no son objetos sino procesos, se resuelve la paradoja que les afecta desde antiguo. Aquiles en su rápida persecución y la tortuga en su lenta huida son dos procesos de distintas direcciones espaciotemporales (se representarían por líneas de universo oblicuas) que no comparten ningún cambio (hecho físico) ni ningún sitiomomento (localización espaciotemporal del hecho) hasta que no se produce la coincidencia de ambos en el sitiomomento «alcance». Al negarse que Aquiles y la tortuga sean realidades espaciales que comparten recorrido y tiempo, los argumentos paradójicos pierden su fuerza.

12. NOTAS FINALES

Para terminar, pueden tener sentido algunas notas que ayuden a caracterizar la concepción del universo de procesos presentada aquí al contrastarla con otras. Tocan cuestiones propias de la filosofía de la ciencia en los que este trabajo no pretende entrar, pero que están en la frontera de los contenidos científicos por los que el trabajo se mueve. Son solo apuntes breves cuya mayor virtud sería suscitar su discusión.

12.1. *Sobre evolución y cudridimensionalidad*

Hay dos ideas que determinan la ruptura con la concepción clásica del mundo. Una, que la realidad es evolutiva; otra, que la realidad integra espacio y tiempo inseparablemente. La primera es el resultado de

investigaciones que arrancan con las seminales hipótesis de cambios geológicos, hacia 1650, y se extienden hasta la aceptación generalizada del modelo Big bang hacia 1960. En el camino, se acumularon evidencias de la evolución geológica, biológica, social, histórica y cosmológica (Toulmin y Goodfield, 1990). La segunda es original de la TRE y es una de sus más fundamentales aportaciones a los conceptos de la física

Lo común es pensar esas dos ideas por separado. La de evolución se asocia a la biología, a la teoría de Darwin; la de cuatridimensionalidad a la física, a la relatividad de Einstein. Pero no son incompatibles, y mezclan bien. La biología ilumina los escenarios de la cuatridimensionalidad, propios de la física, cuando se hace protagonista en la paradoja de los gemelos; y la física refuerza los escenarios de la evolución, propios de la biología, cuando afirma que la realidad es una maraña de procesos de cambio.

En el marco conceptual del universo de procesos, todo cambia, todo es proceso y todo es cuatridimensional. Ser real en el universo de procesos es estar cambiando, estar en proceso: la idea de evolución biológica encaja ahí como caso de proceso particular. Por otra parte, basta admitir que los procesos de cambio, biológicos o no, pueden tener muchas direcciones distintas, para que resulte una cuatridimensionalidad que integre los aspectos espaciales y temporales como pide la TR. Toda la realidad del universo de procesos, no sólo la biológica, es evolutiva, y toda, no sólo la de las enormes velocidades, es cuatridimensional. Tan procesos biológicos y cuatridimensionales son los humanos gemelos de la paradoja como todos los que vivimos nuestro acostumbrado mundo de velocidades pequeñas, esto es, de procesos casi paralelos, mundo en el que tenemos evidencia de nuestro ser cambiantes, pero no de nuestra cuatridimensionalidad. La concepción del universo de procesos integra evolución y cuatridimensionalidad como propiedades generales de la realidad material.

12.2. *Sobre cuatridimensionalidad y dinamismo*

El universo de procesos está en proceso, como todos sus componentes, lo que supone una concepción dinámica de la realidad física. Puede contraponerse a la del universo-bloque, que concibe la realidad como el conjunto cuatridimensional de todos los hechos físicos habidos y por haber, sin distinción alguna entre pasados, presentes o futuros. Tal conjunto, simplemente, es. Su dimensión temporal está espacializada: como las dimensiones espaciales, se concibe enteramente dada. En esa concepción, también los procesos estarían enteramente dados: serían

conjuntos de todos los cambios que los constituyen, acontecidos y por acontecer. Al contrario, en la concepción del universo de procesos los procesos están en marcha, los cambios acontecen en sucesión y la realidad es un conjunto de cambios de todos los procesos, conjunto que siempre está en mudanza.

En defensa de la concepción del universo-bloque, se arguye que solo en un marco cuadridimensional tienen explicación consistente los fenómenos relativistas y que la cuadridimensionalidad requiere que la dimensión temporal esté enteramente dada: "Si la dimensión temporal no estuviera enteramente dada, como las espaciales, el universo de Minkowski no sería cuadridimensional" (Petkov, 2005, 148). Es cierto que la explicación de los fenómenos relativistas requiere la cuadridimensionalidad, pero no hace falta pensar en una dimensión temporal espacializada para explicar cuadridimensionalmente los fenómenos cinemáticos de la TRE. Cuadridimensionalidad y cambio permanente son compatibles.

Se trata de distinguir entre la realidad y su representación. Bohm señaló que lo que único que queda del pasado en un momento dado son rastros, registros o memorias que pueden servir para reconstruirlo, y que el diagrama de Minkowski puede interpretarse como una reconstrucción del pasado:

Con todo esto en mente, planteemos la cuestión de qué puede significar realmente el diagrama de Minkowski. La respuesta es que este diagrama es una especie de mapa de eventos en el mundo, que puede darnos correctamente el orden, las pautas y la estructura de eventos reales, pero que no es, en sí, el mundo como realmente es (Bohm, 2006, 213-214).

Las experiencias relativistas de desincronización de relojes y de «contracción de longitudes» implican medidas de duración que se completan cuando se cumple el proceso correspondiente, de modo que explicar sus resultados consiste en explicar relaciones entre medidas de duración de procesos del pasado. Lo que evidencian esas relaciones es que las colecciones de cambios se sucedieron cuadridimensionalmente, que los procesos tenían distintas direcciones de cambio en el espaciotiempo. Pero lo evidencian a posteriori, cuando el proceso medido ya transcurrió. Por eso no dicen nada acerca de que los cambios pasados permanezcan o de que los cambios por venir estén ya dados. En el universo de procesos, ambas posibilidades se rechazan porque contradicen la idea misma de cambio y de realidad cambiante. La cuadridimensionalidad se sostiene sin que la coordenada temporal esté completamente dada. El cambio duradero tiene profundidad en sí mismo. La dimensión del cambio se extiende en sucesiones causales, y se extiende de una forma esencialmente distinta a las

espaciales: no estando enteramente dada. Ese podría ser el significado profundo de que en la signatura métrica del espaciotiempo, (+, -, -, -), el signo de la dimensión del cambio sea opuesto al de las dimensiones espaciales.

12.3. *Sobre procesos y presentes*

La concepción del universo de procesos es fibrosa: cada fibra es un proceso, un elemento básico de la realidad que se caracteriza por la sucesión incesante de sus cambios (ordenados por una relación causal que permite establecer entre ellos relaciones de antes y después), por su duración y por las relaciones geométricas con las duraciones de otros procesos. Esto la distingue de las concepciones foliadas, en las que cada hoja, un «presente», es una realidad caracterizada por la relación de simultaneidad y por las relaciones espaciales de sus objetos tridimensionales.

Robb mostró que la definición causal del orden antes/después se asocia a un orden de sucesión que no es lineal, sino «cónico», y a una simultaneidad que solo puede ser local, y que basta desarrollar sus consecuencias lógicas (Robb lo hizo sin mención alguna a relojes o reglas) para construir una geometría igual a la del espaciotiempo de Minkowski:

El sistema geométrico así construido alcanzará al final una especie de carácter cuadrídimensional, o mejor, podríamos decir, cada uno de sus elementos está determinado por cuatro coordenadas.

Resulta entonces que la teoría del espacio viene a ser absorbida en la teoría del tiempo, viéndose las relaciones espaciales como manifestación del hecho de que los elementos del tiempo forman un sistema de orden cónico: una concepción que debe ser analizada en términos de las relaciones de antes y después. (Robb, 1914, 9 y 370, cursivas del original).

En el universo de procesos, la preeminencia de los procesos respecto a los «objetos» se corresponde con la preeminencia del tiempo sobre el espacio en la construcción axiomática de Robb. Las realidades físicas del universo de procesos son los procesos. Las entidades definidas por simultaneidad («presentes», «objetos») no tienen esa categoría; tienen solo carácter formal: son cortes tridimensionales subjetivos de realidades cuadrídimensionales. En coherencia, mientras que la duración es una magnitud fundamental y absoluta, las magnitudes espaciales son derivadas y subjetivas

La existencia de un límite superior para la transmisión de señales e interacciones (el mismo que conlleva que todo conocimiento sea del pasado y que el orden causal sea «cónico») impide afirmar la realidad de los «presentes». De los hechos que un observador pueda incluir en su

«presente», sólo a posteriori se podrá afirmar si acontecieron. Por tanto, los «presentes», como los «objetos», tienen siempre la condición de hipótesis, muy útiles para la interpretación de la realidad cambiante, próxima o lejana, y también muy razonables, porque resultan probadas multitud de veces, en sucesión imparable.

12.4. *Sobre cambio y realidad*

En la concepción del universo de procesos se afirma la realidad de los cambios concatenados sin predicarlos de sistema material alguno; no se piensa primero en los objetos y luego en sus cambios sino al revés: de los cambios concatenados se predicen propiedades espaciales.

Bergson tranquiliza acerca de la aparente insustancialidad del cambio sin soporte:

[...] ya se trate del interior o ya del exterior, ya de nosotros o ya de las cosas, la realidad es la movilidad misma. Es lo que yo expresaba diciendo que hay cambio, pero que no hay cosas que cambian. Ante el espectáculo de esta movilidad, algunos de nosotros serán presas del vértigo. [...] Estiman que si todo pasa, nada existe; y que si la realidad es movilidad, no existe ya en el momento en que se la piensa: escapa al pensamiento. [...] ¡Que se sosieguen! El cambio, si consienten en mirarlo directamente, sin velo interpuesto, les parecerá bien pronto como aquello que puede haber en el mundo de más sustancial y de más durable. Su solidez es infinitamente superior a la de una fijeza que no es más que un reajuste efímero entre movibilidades (Bergson, 1976, 139).

Efectivamente, la realidad construida sobre el cambio desnudo parece castillo en el aire, pero en el marco del universo de procesos hay argumentos físicos para apuntalarla:

- a) Los cambios no se presentan aislados, sino en sucesiones concatenadas.
- b) Los procesos no son independientes. Interaccionan con otros y forman agrupaciones persistentes. Los cambios se encauzan entre sí. El conjunto de todos ellos parece estar autoencarrilado.
- c) Las direcciones de cambio posibles no son cualesquiera: están limitadas por las direcciones de los procesos luz, por el cero absoluto de las duraciones.
- d) La duración de los procesos estructura el conjunto, da solidez al cambio ubicuo y permanente.
- e) El universo de procesos aporta significado físico concreto al espacio-tiempo y a las experiencias que prueban su geometría.

- f) La consistencia global de la concepción del universo de procesos justificaría a posteriori la arriesgada apuesta inicial por el cambio como cimiento de la realidad.

12.5. *Sobre procesos y espaciotiempo*

Establecer con precisión cómo se relacionan los procesos con el espacio y el tiempo (Seibt, 2022) es un reto de la filosofía de procesos. En la concepción del universo de procesos, espacio y tiempo por separado no tienen sentido. Los procesos (entidades de carácter cuadrimensional), sus duraciones (medidas de reloj) y los ángulos que forman entre sí sus direcciones de cambio (experimentados como velocidades relativas) determinan la estructura del espaciotiempo. Las medidas de relojes son las únicas que permiten determinar las localizaciones espaciotemporales de los hechos físicos, de manera que la estructura del espaciotiempo (Synge, 1960, 108-109) puede etiquetarse como cronometría, estructura definida por medidas de reloj, más que como geometría, estructura que se asocia a medidas con reglas. En nuestro entorno de procesos casi paralelos, la cronometría aparece como sincronía de procesos acoplados.

12.6. *Sobre cambio y reversibilidad*

Los cambios, por su propia naturaleza, son irreversibles. Revertir los de un proceso complejo no es deshacerlos: es hacer otros más, distintos, que devuelven a una configuración espacial anterior, pero que no devuelven a los sitiomomentos de partida. Espaciotemporalmente hablando, ningún cambio es reversible, porque lo que importa no son los estados sino los *estadomomentos* y todos ellos son irrepetibles.

Para argumentaciones sobre viajes en el tiempo lo anterior es determinante. En el universo de procesos pueden imaginarse, para regiones concretas o para el universo entero, topologías en las que sea posible que un proceso, siguiendo un bucle, empiece y termine en sitiomomentos que tengan las mismas coordenadas espaciotemporales. Pero, como todos, ese proceso dura, y el recorrido espaciotemporal por el bucle acabará en un conjunto de cambios distintos a los de partida, distintos al menos porque tienen una historia diferente a la de aquellos. De los cambios habidos en un sitiomomento no queda nada. Se podrán repetir las coordenadas, pero no se podrá repetir la realidad.

13. CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se ha mostrado que el universo de procesos es un modelo de la realidad física cuyas aportaciones más relevantes serían:

1. Dotar de significado físico al espaciotiempo y a su estructura geométrica.
2. Dar cabida a una definición de reloj y a un significado de sus medidas que quedan libres de la palabra tiempo y de las ambigüedades derivadas de su polisemia
3. Posibilitar una definición de duración como propiedad física de realidades concretas, sin referencias al tiempo abstracto, que se puede identificar con el «tiempo propio» relativista y que da cuenta de la estructura el espaciotiempo, de su geometría.
4. Ofrecer un lenguaje que prescinde del «tiempo unidimensional» y de los «objetos tridimensionales», evitando así separar tiempo y espacio en descripciones y explicaciones, para hacerlas consistentes con el carácter cuatridimensional de la realidad física que la TRE reveló.
5. Servir de marco para explicaciones de los fenómenos cinemáticos de la TRE que son estrictamente cuatridimensionales y que no precisan referirse a relojes que adelantan o atrasan, a tiempos que pasan más deprisa o más despacio o a «objetos tridimensionales» que cambian sus dimensiones espaciales.
6. Compatibilizar el carácter cambiante y el carácter cuatridimensional de la realidad física, proponiendo la realidad de los cambios sin predicarlos de sistema material alguno y dando razones para justificar que su concatenación causal en procesos estructura cuatridimensionalmente el conjunto de todos ellos.
7. Aportar posibles elementos de debate sobre temas propios de la filosofía de la ciencia que son próximos a los contenidos científicos que el trabajo trata.

REFERENCIAS

- Bergson, Henri (1976). La percepción del cambio. En *El pensamiento y lo moviente*. Madrid: Espasa Calpe.
- Blanck-Cerejido, Fanny y Cerejido, Marcelino (1988). *La vida, el tiempo y la muerte*. México D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Bohm, David (2006). *The special theory of relativity*. London: Routledge.

- Bondi, Hermann (1980). *Relativity and common sense*. New York: Dover Publications.
- Eddington, Arthur (1959). *Space, time and gravitation*. New York and Evaston: Harper and Row.
- Hartle, James (2003). *Gravity. An introduction to Einstein's general relativity*. San Francisco: AddisonWesley.
- Jerison, Harry (1973). *Evolution of the brain and intelligence*. New York: Academic Press.
- Langevin, Pierre (1911). L'Évolution de l'espace et du temps. *Atti IV Congresso Internazionale di Filosofia*, 1, pp 193-214. Bolonia.
- Minkowski, Hermann (2012). Space and time. En *Space and Time. Minkowski's Papers on Relativity*. Minkowski Institute Press (free version).
- Penrose, Roger (2011). *La nueva mente del emperador*. Barcelona: Debolsillo.
- Petkov, Vesselin (2005). *Relativity and the nature of spacetime*. Berlin: Springer-Verlag.
- Robb, Alfred (1914). *A theory of time and space*. London: Cambridge University Press.
- Rovelli, Carlo (2018). *El orden del tiempo*. Barcelona: Anagrama.
- Seibt, Johanna (2022). Process Philosophy, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N Zalta & Uri Nodelman (eds), <https://plato.stanford.edu/archives/fall2022/entries/process-philosophy/>
- Synge, John Lighton (1960). *Relativity: the general theory*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.
- Szamosi, Géza (1986). *The twin dimensions. Inventing time & space*. New York: McGraw-Hill.
- Taylor, Edwin y Wheeler, Jhon (1992). *Spacetime Physics*. New York: Freeman and Company.
- Tomé, Juan (2021). Relatividad Especial: una interpretación del fenómeno de la dilatación temporal. *Revista Española de Física*, 35(2), 7-11.
- Tomé, Juan (2022). Adelantamiento de trenes en el espaciotiempo. *Revista Española de Física*, 36(4), 10-15.
- Toulmin, Stephen, y Goodfield, June (1990). *El descubrimiento del tiempo*. Barcelona: Paidós.
- Zubiri, Xavier (2010). *Acerca del mundo*, Madrid: Alianza.