

Procesos y líneas de universo; duraciones, tiempos propios e intervalos

Juan Tomé

Amonaria cosmológica / Libros / Los relojes no miden el tiempo: textos complementarios

www.cosmologica.amonaria.com



Este texto se concibió como complemento del libro “Los relojes no miden el tiempo”. Aunque puede leerse como separata, gana sentido en relación con él.

Al usar la analogía entre caminos tridimensionales y líneas de universo cuadrimensionales, suele pensarse en caminos reales en la superficie terrestre y líneas de universo asociadas a procesos reales. Pero pueden imaginarse caminos y líneas de universo abstractos: caminos sin soporte material y líneas de universo sin procesos que las materialicen.

Un camino en la superficie terrestre es un objeto material. La medida de su longitud es una comparación entre dos objetos: el objeto “camino” se compara con un objeto patrón (un metro, una cinta métrica). La longitud del camino es el número de veces que cabe el patrón en el camino. En cambio, un camino entre la Tierra y Neptuno no es un objeto material. Se describirá, como los caminos terrestres, por una colección de triadas numéricas que den las coordenadas espaciales de los sitios (abstractos) por donde vaya pasando, pero no es un objeto, no está apoyado en nada, no se puede pisar. La longitud de un camino así, abstracto, también es una abstracción, porque no puede ser resultado de la comparación directa de dos objetos, porque no hay objeto alguno entre la Tierra y Neptuno cuya longitud se compare con el objeto patrón para medir la longitud del camino abstracto entre los dos planetas. Cuando se da la longitud del camino que una nave Voyager hizo entre la Tierra y Neptuno, cuando se dice que recorrió tantos o cuantos kilómetros, lo que se está diciendo es que si se tendiera una cinta métrica a lo largo de toda la trayectoria de la nave, se constataría que cabrían tantos o cuantos kilómetros en ese camino abstracto, que solo existe pintado, a escala, sobre papeles o pantallas. La cinta métrica, un objeto graduado según el patrón de longitudes, es el único objeto (y no real, sino imaginado) que se tiende entre la Tierra y Neptuno para medir la longitud del camino de la Voyager o la distancia en derechura entre los dos planetas.

Lo mismo que hay caminos abstractos en el espacio, hay líneas de universo abstractas en el espaciotiempo, líneas de universo que no corresponden a ningún proceso concreto. Un proceso es una realidad física, es una sucesión de cambios causalmente relacionados que conecta dos hechos físicos: el que se toma por inicio del proceso y el que se toma por final. La medida de su duración es una comparación del proceso con un proceso patrón, con un reloj. La duración del proceso es el número de veces que el reloj repite el proceso patrón desde que el proceso empieza hasta que acaba. Se trata de contar esas repeticiones entre dos hechos físicos: el principio y el final del proceso. Pero, dados dos hechos físicos

que no sean principio y fin de un proceso, que no estén siquiera relacionados por un proceso concreto (la llegada de Colón en la carabela Santa María a la isla La Española y la de Armstrong a la Luna en la nave Apolo XI por ejemplo), puede definirse una línea de universo que los conecte, una línea de universo abstracta, descrita sólo por una colección de cuaternas numéricas que den las coordenadas espaciales y la temporal de los sitiomomentos (abstractos) que la constituyen. La longitud cuadrimensional de una línea de universo así, abstracta, también es una abstracción, porque no hay ningún proceso concreto que conecte la llegada a las costas americanas de la Santa María y el alunizaje de la Apolo XI, ningún proceso que se pueda comparar con un proceso patrón, con un reloj, para medir la longitud de esa línea de universo. Cuando se da la longitud de la línea de universo que empieza cuando Colón pone el pie en La Española y termina cuando Armstrong lo pone en la Luna, es decir, cuando se dice que entre ambos hechos físicos caben tantos o cuantos años, lo que se está diciendo es que si se hubiera tendido un proceso patrón (un reloj que se hubiera puesto en marcha cuando Colón pisó La Española, que se hubiera mantenido funcionando desde entonces, que se hubiera embarcado en la Apolo XI y que se hubiera detenido cuando Armstrong puso el pie en la Luna) a lo largo de esa línea de universo abstracta, se constataría que cabrían tantos o cuantos años en ella. El reloj, un proceso graduado según el patrón de duraciones, es el único proceso (y no real, sino imaginado) que se tiende entre la llegada de Colón a La Española y la de Armstrong a la Luna.

Para un proceso real, que conecta dos sitiomomentos del espaciotiempo, la longitud cuadrimensional de la línea de universo es, físicamente, la duración del proceso, que se mide con un reloj que acompañe al sistema en el que el proceso se desarrolla, es decir, con un reloj en reposo relativo respecto al sistema. De esa forma, la línea de universo del sistema y la del reloj son paralelas, sus longitudes cuadrimensionales son iguales y las duraciones del proceso y del proceso reloj también. Pues bien, cuando se trata de líneas de universo que no correspondan con un proceso, el significado físico de sus “longitudes” sigue estando relacionado con la duración de procesos de la siguiente manera: si hubiera un proceso concreto que se desarrollara a lo largo de todos los sitiomomentos de la línea de universo, lo que se predica como longitud de la línea de universo es la duración de ese proceso concreto posible. Interesa señalar que ese proceso concreto posible siempre existe: es un reloj que recorriera la línea de universo. Tal reloj tendería un proceso patrón a lo largo de línea de universo y contaría las repeticiones del patrón que cupieran entre el sitiomomento inicial y el final. La medida de ese reloj imaginario sería la longitud de la línea de universo.

Pero hay propiedades del espaciotiempo que no tienen análoga en el espacio. Por ejemplo, mientras que en el espacio hay siempre un camino posible (real o imaginado) entre dos sitios cualesquiera, en el espaciotiempo hay sitiomomentos que no pueden estar conectados por ningún proceso (ni real ni imaginado). Entre tales sitiomomentos, por tanto, no hay línea de universo posible, no hay “camino cuadrimensional” posible. La razón es que, según la TR, la velocidad de la luz (c) es una constante universal que no depende del SR en que se mida, y tiene, además, el carácter de velocidad límite no

superable. Nada, ni la propagación de interacciones, ni la transmisión de señales, ni los movimientos de objetos materiales, puede ser más rápido que la luz.

Físicamente, un sitiomomento se asocia a un suceso, a un cambio, tan sutil como se quiera, en un sistema físico. Si un cambio físico está separado espacialmente de otro más que lo que la luz puede recorrer desde que se produce el uno hasta que se produce el otro, ambos cambios no pueden estar conectados por un rayo de luz. Es decir, un rayo de luz emitido donde se produzca uno de los cambios llegará a donde se produce el otro cuando éste ya haya acontecido. Ningún proceso podrá relacionar esos cambios, porque ninguna interacción se transmite más rápido que la luz. Se tratará de dos cambios no conectados causalmente entre sí. No importa el carácter o la magnitud de esos cambios: ninguno de los dos podrá tener influencia alguna en el otro. Ni siquiera la noticia de uno podría alcanzar al otro y afectarlo. Ese es el significado físico de la afirmación “en el espaciotiempo hay sitiomomentos que no pueden estar conectados por una línea de universo”.

Consideremos sitiomomentos de la Tierra y sitiomomentos de Neptuno. La distancia espacial entre Neptuno y la Tierra es de unos 5000 millones de km. La luz tarda unas 4 horas en recorrer esa distancia. En consecuencia, no hay manera de conectar físicamente el sitiomomento “Tierraahora” con cualquier sitiomomento de Neptuno que sea anterior al “Neptunocuatrohorasdespués”, ni el sitiomomento “Neptunoahora” con cualquier sitiomomento anterior al “Tierracuatrohorasdespués”. Lo que suceda en la Tierra, o en Neptuno, ahora, no podrá tener influencia alguna en Neptuno, o en la Tierra, hasta cuatro horas después. De lo que suceda en Neptuno ahora sólo podremos tener noticias cuatro horas después. Podría explotar Neptuno ahora, desaparecer, y seguir viéndose en los telescopios terrestres durante cuatro horas, las que tardara en llegar el destello luminoso que trajera la noticia de la explosiva desaparición. Nuestro conocimiento de Neptuno tiene siempre cuatro horas de “retraso”. No hay, en resumen, procesos físicos posibles, relaciones causales posibles entre cualesquiera sitiomomentos de la Tierra y de Neptuno que no estén separados cuatro horas al menos. En el lenguaje formal de la TR, no hay líneas de universo posibles entre esos sitiomomentos del espaciotiempo.

Es posible, sin embargo considerar formalmente líneas rectas trazadas entre cualquier par de sitiomomentos, estén o no causalmente conectados. Tales rectas serán líneas de universo cuando se tracen entre dos sitiomomentos que puedan estar causalmente conectados. Cuando se tracen entre dos sitiomomentos que no puedan estar causalmente conectados, serán objetos abstractos, estrictamente geométricos, que no podrán tener asociado proceso físico alguno, así que no serán líneas de universo. Pero de todas esas rectas abstractas, sean o no líneas de universo, se puede definir formalmente la longitud, que tiene el sentido geométrico de distancia entre sitiomomentos del espaciotiempo, lo mismo que la longitud de rectas trazadas entre puntos del espacio tienen el sentido de distancia espacial entre esos puntos. En el lenguaje de la TR, se llama *intervalo* a la longitud de cualquier línea trazada en el espaciotiempo. En particular, se llama intervalo a la longitud de las rectas trazadas entre cualesquiera dos sitiomomentos del espaciotiempo. Intervalo es la distancia espaciotemporal.

Intervalo (en el espaciotiempo) y distancia (en el espacio) son conceptos geométricos análogos, pero hay diferencias entre ellos, debidas a las propiedades geométricas intrínsecas del espaciotiempo, que difieren de las del espacio. En el espacio, existe siempre un camino posible que conecte dos sitios cualesquiera y, en consecuencia, toda distancia entre dos sitios se puede interpretar como la longitud del camino rectilíneo posible entre esos dos sitios. Pero en el espaciotiempo, ya se ha dicho antes, a causa del carácter de c como límite no superable para las velocidades, no siempre es posible un proceso físico (real o imaginado) que conecte dos sitiomomentos. En consecuencia, para cualesquiera dos sitiomomentos se podrá definir el intervalo, la distancia cuadrimensional, que los separa; pero solo para los sitiomomentos para los que pueda existir una relación causal, el intervalo podrá tener el significado físico de duración.

Se puede, por ejemplo, definir geoméricamente una línea que conecte “Tierraahora” con “Neptunounahoradespués”, pero no hay proceso ninguno, ni real ni imaginario, cuyo principio sea “Tierraahora” y su final “Neptunounahoradespués”. Se puede definir, y calcular, el intervalo, la distancia cuadrimensional, que separa “Tierraahora” de “Neptunounahoradespués”, pero no tendrá el significado físico de duración. De hecho, cuando se hace el cálculo formal de esa distancia, se obtiene un número negativo. Desde el punto de vista geométrico, la posibilidad de intervalos negativos es una característica del espaciotiempo. Su geometría lo permite, y eso lo diferencia del espacio, donde todas las distancias son positivas. En cambio, desde el punto de vista físico, la duración negativa es absurda. No tiene sentido que algo dure menos que nada. No se puede, por tanto, dar el significado de duración a los intervalos negativos, en perfecta correspondencia con la imposibilidad de encontrar un proceso que conecte dos sitiomomentos separados por un intervalo así.

La duración cero es un límite inferior para las duraciones, y es la que corresponde a las líneas de universo de las interacciones o de las señales que se mueven con velocidad c . Por ejemplo, la línea de universo de un rayo de luz que conecta “Tierraahora” con “Neptunocuatrohoradespués” tiene longitud cero. La duración del proceso “rayo de luz que se emite en Tierraahora y se detecta en Neptunocuatrohoradespués” es cero. Los procesos de duración cero, límite inferior para las duraciones, corresponden con la conexión de dos sitiomomentos mediante interacciones que viajen a c , límite superior para las velocidades.

Pueden pues calcularse intervalos entre dos sitiomomentos cualesquiera del espaciotiempo y tendrán el sentido geométrico de distancias cuadrimensionales. Los habrá positivos, nulos y negativos. Pero sólo tienen significado físico los positivos y los nulos, que son los intervalos que se pueden interpretar como longitud cuadrimensional de una línea de universo y como duración de un proceso físico real posible.

Intervalo (en el espaciotiempo) y distancia (en el espacio) son conceptos geométricos abstractos. Duración de procesos (en el espaciotiempo) y longitud de objetos (en el espacio) son magnitudes físicas concretas relacionadas con intervalo y distancia, a los que dan significado físico. Pero mientras «longitud» da significado a todas las distancias, «duración» solo lo da a algunos intervalos, precisamente a aquellos que pueden ser

medidos directamente con relojes, es decir, con procesos patrón tendidos entre los sitios extremos de la línea de universo a la que el intervalo corresponde. Por eso, a veces, se conocen las líneas de universo como líneas de tipo tiempo; y a su longitud cuadrimensional como “tiempo propio”.

“[...] un reloj que se mueve a lo largo de una curva de tipo tiempo mide la distancia τ a lo largo de ella. Un nombre alternativo para esta distancia es “tiempo propio” —el tiempo que sería medido por un reloj transportado a lo largo de la línea de universo.” (Hartle, Gravity. An introduction to Einstein’ general relativity, p 60)

“La «longitud» minkowskiana s del segmento OP tiene una interpretación física directa: ¡es el *intervalo temporal* experimentado realmente por la partícula entre los sucesos O y P! Dicho de otro modo, si hubiera un reloj robusto y preciso unido a la partícula, entonces la diferencia entre los tiempos que registra entre O y P es precisamente s .” (Penrose, La nueva mente del emperador, p 295)

“Hay una interpretación física del intervalo-longitud a lo largo de la línea [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 [...]

Podríamos usar el tiempo propio, en general, como equivalente al intervalo-longitud; pero debe admitirse que el término no es muy lógico excepto si la línea en cuestión es una línea natural. Para cualquier otra línea, la dificultad de definir el intervalo-longitud como el tiempo medido por un reloj que sigue la línea, es que no hay reloj que pueda seguirla sin violar las leyes de la naturaleza.” (Eddington, Space, time and gravitation, p 71)

“La edad, o el envejecimiento o el tiempo propio, medido por un reloj que se lleva consigo, es lo que cuenta para un objeto en movimiento, no el tiempo del laboratorio —resumo—.” (Wheeler, Un paseo por la gravedad y el espaciotiempo, p 55-56)

Las líneas de universo “naturales” a las que Eddington se refiere son las que pueden seguir los sistemas materiales: aquellas cuyos sitios extremos tienen conexión causal, es decir, que pueden estar conectados por interacciones propagadas a velocidades menores o iguales que c , la velocidad de la luz. Ningún sistema material, relojes incluidos, claro, puede seguir líneas de universo no causales. Queda así el tiempo propio, lo mismo que la duración, asociado a procesos “naturales” de los sistemas materiales. Y el tiempo propio, la edad, o el envejecimiento, a que se refiere Wheeler, vale para un viaje en avión y para la vida de una persona, procesos “naturales” ambos, cuya “longitud”, su duración, se

cuenta por el número de tictacs de un reloj que viaje en el avión o por el número de ciclos biológicos (tictacs biológicos) que cuenten los relojes biológicos de la persona.

“Tiempo propio” y “duración de un proceso” son, efectivamente, la misma cantidad física. Ambas cosas son lo que mide un reloj fijado al sistema material que recorre una línea de universo dada, un reloj que pasa, por tanto, por todos los sitiomomentos de esa línea de universo; ambas cosas se interpretan como longitud cuadrimensional de la línea de universo; ambas cosas son esencialmente positivas, porque el número de tictacs que cuente un reloj no puede ser negativo ni tiene sentido que algo dure menos que nada; y ambas cosas corresponden con el intervalo a lo largo de la línea en cuestión, esencialmente positivo, como ellas.

“Tiempo propio” es un término habitual del lenguaje relativista. Pero en ningún texto de relatividad se encontrará la idea de “duración de un proceso” —concepto clave en el libro “Los relojes no miden el tiempo”— junto a la de “tiempo propio”. En Taylor y Wheeler, *Spacetime physics*, se encuentran varias expresiones que sugieren la importancia de las sucesiones de eventos, de hechos físicos, en la descripción de la realidad física:

“¿Estabas allí, en el primer evento? Sí. ¿Y en el segundo? Sí. ¿Y en el último? Sí. ¿Convendrán todos en el universo que estuviste presente en cada evento de esa cadena? Sí. ¿Convendrán todos en lo que avanza tu reloj de muñeca de evento en evento a lo largo de la cadena entera? ¡Sí!” (Interior de la cubierta)

“Los eventos son granos chispeantes de la historia. Definen el espaciotiempo. Espaciotiempo, sí. Tiempo no.” (p 137)

“Los eventos —perlas en el espaciotiempo— existen independientemente de cualquier sistema de referencia que elijamos para describirlos. Una línea de universo ensarta esos eventos perla. La línea de universo.” (p 144)

Los eventos son hechos físicos, realidades independientes de los observadores, de los sistemas de referencia que éstos elijan para describirlos. Forman parte de historias. Son perlas que se ensartan en líneas de universo, y estas líneas de universo también existen independientemente de cualquier sistema de referencia. Pero los eventos son hechos físicos, mientras que las líneas de universo son elementos geométricos. ¿Por qué al ensartar hechos físicos no se obtiene una realidad física? Una pieza parece faltar en este puzle de ideas: ¿qué realidad física constituyen los hechos físicos ensartados en líneas de universo? Procesos, es la respuesta, eso es lo que falta para completar correspondencias entre realidades físicas y elementos de su representación.

Y tales correspondencias se pueden describir así:

- El universo físico admite una representación espaciotemporal: el espaciotiempo. Los hechos físicos, eventos, se asocian a sitiomomentos, “puntos” en el espaciotiempo. Los hechos físicos se ensartan en cadenas causales, en procesos. Y esos procesos, realidades físicas, se corresponden con las líneas de universo, elementos geométricos del espaciotiempo.

- El intervalo, la longitud cuadrimensional de una línea trazada entre dos sitios momentos cualesquiera, es el elemento básico de la geometría del espaciotiempo. Pero solo los intervalos-longitud (usando la terminología de Eddington) de líneas de universo, las líneas que pueden ser seguidas por sistemas físicos, son positivos.
- La duración, propiedad física de los procesos esencialmente positiva, se corresponde con el intervalo-longitud de líneas de universo, una propiedad geométrica. Así como el intervalo es elemento básico de la geometría espaciotemporal, la duración es magnitud fundamental del universo físico.
- La invariancia del intervalo-distancia se considera propiedad fundamental del espaciotiempo. Es razonable entonces considerar la invariancia de la duración como propiedad fundamental del universo físico.

Pensar en el universo físico como un conjunto de objetos a los que suceden eventos, hechos físicos, no es terreno fértil para que nazca la idea de duración, que es algo así como la longitud de una sucesión causal de cambios. Pero basta pensar en procesos como realidades físicas para que surja esa idea de forma natural, porque se admite sin esfuerzo que los procesos, por sus propias características, puedan durar más o menos, se puedan “extender” más o menos.

Al constatar que la magnitud duración tiene en el universo físico el mismo papel protagonista que el intervalo en el espaciotiempo, es razonable considerar los procesos como elementos básicos de la realidad física, en detrimento de los hechos puntuales, de los eventos. El reconocimiento del carácter permanentemente cambiante de la realidad física, apoya esa consideración.

”Una partícula tiene siempre una línea de universo en el espaciotiempo. Aunque estés quieto en tu silla leyendo este libro, te deslizas en el espaciotiempo por tu propia, única, línea de universo. Todos los objetos estacionarios cercanos a ti trazan también una línea de universo, paralela a la tuya propia en tu mapa del espaciotiempo.” (Taylor y Wheeler, Spacetime physics, p 145)

Los objetos serían procesos de larga duración, cosa que explicaría su aspecto de permanencia. Nosotros mismos, sistemas en desequilibrio, en cambio continuo, también somos procesos. Todo en el universo es proceso. Podría llamarse “universo de procesos” a la realidad física así entendida. Llegamos entonces a la correspondencia final entre realidad física y su representación: el universo de procesos se corresponde con el espaciotiempo de las líneas de universo. Se entiende que las propiedades geométricas de ese espaciotiempo sean las propiedades más profundas del universo de procesos.

Esta es, en resumen, la propuesta general del libro “Los relojes no miden el tiempo”: hacer de los procesos, de las cadenas de cambios causalmente relacionados, los elementos básicos de la realidad física y de su descripción cuadrimensional; conceder a la duración, propiedad de los procesos, el mismo papel estructurante de la realidad física que tiene el intervalo como estructurante de la geometría del espaciotiempo; poner el foco más en el «universo de los procesos» que en el «universo de los objetos y los eventos», más en el espaciotiempo de las líneas de universo que en el espaciotiempo de los sitios momentos.

La discusión que se realiza en el libro acerca de qué son y qué miden los relojes, la que permite asociarlos a la medida de una magnitud física concreta (duración de procesos) en lugar de cantidades más abstractas (tiempo relativo, tiempo propio), de significado más geométrico que físico, es clave para fundamentar esa propuesta general. Sin esa discusión no hubiera sido posible reconocer que cada reloj es un proceso, uno más (aunque de un tipo especial) del universo de procesos, comparable con otros, sometido a las mismas leyes físicas. Los relojes quedan así integrados en la realidad física que se pretende conocer. Sus medidas ya no pueden ser las de abstracciones, tiempo absoluto, tiempo relativo, que no tienen el mismo estatus de realidad física que los sistemas materiales que, a lo largo de esos tiempos, en el marco de esos tiempos, evolucionan. Los relojes, procesos del universo de procesos, miden propiedades de ese universo, duraciones, no “tiempos transcurridos”, “tiempos empleados” o “intervalos de tiempo”, cantidades cuya relación con la realidad física, con los procesos, estaría por precisar.

Bibliografía

Eddington, A., 1920, *Space, time and gravitation*, Ed Harper and Row, New York and Evaston

Hartle, J.B., 2003, *Gravity. An introduction to Einstein's general relativity*, Ed Addison Wesley, San Francisco

Penrose, R., 1989, *La nueva mente del emperador*, Ed Debolsillo, Barcelona, 1991

Taylor, E. Wheeler, J., 1992, *Spacetime physics: introduction to special relativity*, 2nd ed., Ed Freeman and company, New York

Wheeler, J., 1990, *Un paseo por la gravedad y el espacio-tiempo*, Alianza Ed, Madrid, 1994