

Tiempo: relojes, orden y la flecha

IDE-013 · Ideas fundamentales

Ensayos conceptuales para El universo y sus observadores

Autor: Juan Segurola

Versión: v0.10 ES · 19 de septiembre de 2026

Estado: Versión de publicación

Forma del artículo: Ensayo conceptual

Escala / contexto: Del reloj de laboratorio a los intervalos cosmológicos

Límite: El tiempo como concepto físico y operativo: cómo se define, por qué depende del camino y de dónde viene su dirección. La entropía en sí corresponde a IDE-003; el presupuesto de incertidumbre de un reloj como instrumento corresponde a IDE-014

Trabajos relacionados: IDE-014, IDE-003, IDE-023

Perfil epistémico: Conocimiento establecido con límites interpretativos

Licencia en publicación: Todos los derechos reservados

Resumen del artículo

La física no define el tiempo como un flujo. Define una unidad fijando la frecuencia de una transición atómica especificada, y todo lo demás es comparación contra eso.[1] De esa base operativa se siguen tres resultados que la intuición ordinaria no aporta. La simultaneidad de sucesos separados en el espacio depende del estado de movimiento de quien la juzga, así que no hay un ahora universal.[2] El tiempo transcurrido es propiedad de un camino por el espaciotiempo y no del intervalo entre dos sucesos, y relojes en caminos distintos registran totales realmente distintos, algo que los relojes ópticos de laboratorio resuelven hoy sobre una diferencia de altura de decenas de centímetros.[3,5] Y la dirección del tiempo no está en las ecuaciones microscópicas, casi enteramente reversibles: entra por las condiciones de contorno.[6,7] El artículo separa tiempo coordinado, tiempo propio y dirección termodinámica, que suelen confundirse.

En 60 segundos

El segundo del SI se define fijando la frecuencia de una transición hiperfina del cesio-133,[1] lo que convierte la duración en una comparación reproducible y no en la apelación a un reloj universal invisible. Una vez que el tiempo es lo que miden los relojes, la relatividad tiene consecuencias que no son opcionales. Que dos sucesos separados ocurran a la vez depende del movimiento del observador, de modo que la simultaneidad es relativa a un sistema y no un hecho sobre los sucesos.[2] El tiempo propio se acumula a lo largo de una línea de universo, así que dos relojes que se separan y se reencuentran pueden marcar totales distintos sin que ninguno falle, y la gravedad también cambia los ritmos: un reloj más hondo en un potencial gravitatorio va más lento, algo que Pound y Rebka detectaron en una torre y que los relojes ópticos muestran hoy sobre un tercio de metro.[3,4,5] La flecha es otra cuestión. Las leyes microscópicas son esencialmente simétricas ante inversión temporal, así que la asimetría observada de registros, mezcla y memoria tiene que venir de otro sitio, y la respuesta estándar la sitúa en las condiciones de contorno del universo y no en la dinámica.[6,7]

Por qué importa esta pregunta

El tiempo coordenado y el tiempo propio son distintos en relatividad; las flechas termodinámica y psicológica o epistémica son también nociones temporales distintas. El tiempo coordenado es una etiqueta en una descripción elegida; el tiempo propio es lo que acumula un reloj concreto; la dirección termodinámica es una asimetría de procesos; y el tiempo psicológico es otra cosa más. La dilatación temporal parece una ilusión hasta que se separa tiempo propio de tiempo coordenado; la flecha parece misteriosa hasta que se separa de la dinámica; y la navegación por satélite sencillamente falla si se ignora la distinción.

1. El tiempo es lo que miden los relojes

La definición moderna del segundo no describe qué es el tiempo. Fija un número: la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del cesio-133 se define como exactamente 9 192 631 770 hercios, con lo que el segundo queda como consecuencia derivada de esa estipulación.[1] La definición es operativa por diseño, y su virtud es que cualquier laboratorio competente puede realizarla.

Es una retirada deliberada de la metafísica, y es el mismo movimiento hecho con el metro cuando se fijó por definición la velocidad de la luz. Nada en el SI afirma que el tiempo fluya, que el presente se desplace o que el futuro no exista. Lo que proporciona es un patrón reproducible de comparación, y la física trata después de relaciones entre esas comparaciones.

La retirada tiene consecuencias. Como la duración se define mediante un proceso físico, cualquier afirmación sobre el tiempo puede contrastarse construyendo relojes y comparándolos. Preguntas que de otro modo serían incontrastables, como si el tiempo transcurrido depende de la ruta seguida, se vuelven preguntas experimentales con respuestas numéricas y barras de error.[5]

En qué punto estamos

La física define el segundo fijando una frecuencia atómica, así que el tiempo es lo que miden los relojes y la duración es una comparación reproducible y no una descripción de flujo. Esa elección operativa es lo que vuelve contrastables las preguntas difíciles. La primera de ellas es si dos sucesos separados pueden siquiera decirse simultáneos.

2. No hay un ahora universal

El argumento de Einstein de 1905 parte de un procedimiento y no de una filosofía. Para decir que dos sucesos separados son simultáneos hace falta una regla que sincronice relojes distantes, y la regla natural usa señales luminosas. Adoptarla, y exigir que la velocidad de la luz sea la misma en todo sistema inercial, fuerza la conclusión de que observadores en movimiento relativo discrepan sobre qué sucesos separados son simultáneos.[2]

La discrepancia no es un error de medida ni una limitación de los instrumentos. El juicio de cada observador es correcto dentro de su propio sistema, y no hay experimento que identifique uno de ellos como el verdadero. La simultaneidad de sucesos separados es por tanto relativa al sistema, mientras que el orden de sucesos conectables por una señal posible no lo es, lo que preserva el orden causal.

La consecuencia para el tiempo en conjunto es que no puede definirse un presente universal. Las secuencias a lo largo de una sola línea de universo siguen perfectamente ordenadas, así que nada de la experiencia personal se vuelve paradójico. Lo que desaparece es el supuesto de que ese orden se extiende hacia fuera, a todo lo demás, de manera única.

En qué punto estamos

La simultaneidad de sucesos separados depende del sistema, así que no puede definirse un presente universal, mientras que el orden de los sucesos conectables causalmente sobrevive intacto. Nada de la experiencia a lo largo de una línea de universo queda amenazado. De ahí se sigue que el tiempo transcurrido debe adscribirse a caminos y no a pares de sucesos, y eso resulta medible.

3. El tiempo transcurrido pertenece a un camino

En relatividad la magnitud que acumula un reloj es el tiempo propio a lo largo de su propia línea de universo, calculado a partir del intervalo espaciotemporal.[3] Dos relojes que parten juntos, siguen rutas distintas y se reencuentran pueden por tanto marcar totales distintos sin que ninguno haya fallado. La asimetría es geométrica: las rutas tenían longitudes distintas en el sentido pertinente.

La gravedad entra por la misma vía. En relatividad general, un reloj más bajo en un potencial gravitatorio acumula tiempo propio más despacio que otro más alto. Pound y Rebka detectaron el desplazamiento de frecuencia correspondiente a lo largo de la altura de una torre de laboratorio en 1960, aprovechando la agudeza de una resonancia nuclear para resolver un desplazamiento fraccional del orden de unas pocas partes en diez a la quince.[4]

Los relojes ópticos han vuelto el efecto casi doméstico. Chou y colaboradores compararon dos relojes de ion de aluminio y resolvieron la diferencia gravitatoria de ritmo producida al elevar uno de ellos unos treinta y tres centímetros, y midieron además el efecto de velocidades relativas de menos de diez metros por segundo.[5] Sea lo que sea el tiempo, su ritmo depende de forma medible de dónde está un reloj y de cómo se mueve, y los sistemas de navegación por satélite deben corregir ambas cosas para funcionar.

En qué punto estamos

Los relojes acumulan tiempo propio a lo largo de su propio camino, así que rutas distintas dan totales distintos, y el potencial gravitatorio cambia el ritmo. Pound y Rebka lo midieron en una torre y los relojes ópticos lo resuelven hoy sobre un tercio de metro. Eso zanja ritmo y camino, y deja intacta la pregunta de por qué el tiempo tiene dirección.

4. La flecha no está en la dinámica

Las ecuaciones fundamentales de la mecánica, el electromagnetismo y la teoría cuántica son simétricas ante la inversión de la coordenada temporal, con una excepción. Las interacciones débiles violan la conjugación de carga y la paridad del modo más fuerte posible y, aunque la combinación CP se conserva en la mayoría de los procesos débiles, se viola en algunos que implican interferencia; se ha observado violación de la inversión temporal, y es corolario de esa violación de CP dado que CPT es una simetría de la naturaleza.[7] Proyecta hacia atrás una película de moléculas que chocan y cada fotograma sigue obedeciendo las leyes. Y sin embargo los registros se acumulan en una dirección, no se observa que lo mezclado se desmezcle, y recordamos el pasado.

La resolución estándar no añade una ley nueva. Observa que la asimetría que vemos es una asimetría de condiciones iniciales: el universo empezó en un estado de entropía muy baja, y el comportamiento posterior de los sistemas grandes se sigue de esa condición de contorno junto con una dinámica simétrica.[6] La dirección del tiempo, según este relato, se hereda de un hecho sobre cómo empezaron las cosas y no de las ecuaciones.

La aportación de Price es insistir en la simetría del razonamiento: una explicación que funcionaría igual de bien aplicada a la dirección futura no ha explicado nada, y buena parte del razonamiento informal sobre la flecha introduce de contrabando un sesgo temporal desde el principio.[6] El relato es estándar, pero su estatuto es interpretativo y no cerrado, y por qué se dio ese estado inicial de baja entropía sigue siendo una pregunta abierta y no un resultado.

En qué punto estamos

La dinámica microscópica es esencialmente simétrica en el tiempo, así que la flecha observada se atribuye a una condición de contorno de baja entropía y no a una ley. Ese relato es estándar pero interpretativo, y por qué el estado inicial fue así sigue abierto. Lo que sí está claro es que se han llamado tiempo varias cosas distintas, y la última tarea es mantenerlas separadas.

5. De qué tiempo se está hablando

El tiempo coordinado es una etiqueta que una descripción elegida adscribe a los sucesos. Es un recurso contable, y elecciones distintas son igualmente válidas, por lo que un enunciado en tiempo coordinado no tiene contenido físico hasta nombrar el sistema de coordenadas. El tiempo propio es lo que acumula un reloj concreto en un camino concreto, y es invariante: todos coinciden en cuánto registró ese reloj.[3]

La dirección termodinámica no es ninguna de las dos. Es una propiedad de los procesos y no del eje temporal, y es lo que autoriza la distinción entre antes y después en un sistema macroscópico.[6] El tiempo psicológico es otra cosa más, con memoria, atención y construcción de la experiencia, y no es en absoluto una magnitud física.

Inferencia: algunas paradojas temporales aparentes surgen al confundir estas nociones. El enigma de los gemelos mezcla tiempo coordinado con tiempo propio. La afirmación de que la relatividad abole el presente mezcla la simultaneidad dependiente del sistema con el orden a lo largo de una línea de universo. La sospecha de que la física no tiene sitio para el fluir del tiempo mezcla los sentidos termodinámico y psicológico con el geométrico.

En qué punto estamos

IDE-014 recoge qué es un reloj como instrumento, donde la lectura debe convertirse en un valor con su incertidumbre.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- El segundo del SI se define fijando la frecuencia de la transición hiperfina del cesio-133.[1] Que eso haga de la duración una comparación reproducible y no una descripción de flujo es la lectura que hace este artículo de la definición, y no una afirmación del folleto.

- La simultaneidad de sucesos separados en el espacio depende del sistema de referencia, mientras que el orden de los sucesos conectables causalmente no, de modo que la estructura causal sobrevive a la pérdida del presente universal.[2]
- El tiempo transcurrido es tiempo propio a lo largo de una línea de universo y depende del movimiento y del potencial gravitatorio; el efecto se ha medido en una torre de laboratorio y sobre una altura de unos treinta y tres centímetros con relojes ópticos.[3,4,5]
- La dinámica microscópica es simétrica ante inversión temporal salvo en los procesos débiles que violan CP, así que la flecha termodinámica observada se atribuye de forma estándar a una condición de contorno de baja entropía y no a las ecuaciones.[6,7]

Lo que todavía no sabemos

- Por qué el universo temprano estaba en un estado de entropía tan baja, cosa que el relato de la flecha por condiciones de contorno necesita pero no explica.
- Si el tiempo conserva un papel fundamental en una teoría cuántica de la gravitación satisfactoria o emerge de una estructura donde no es primitivo.
- Cómo se relaciona la experiencia psicológica del fluir temporal con las magnitudes físicas, hoy una pregunta sobre la cognición y no una que responda la física.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Una comparación de relojes que no mostrara diferencia gravitatoria de ritmo a una separación de altura donde el desplazamiento fraccional predicho queda holgadamente dentro de la resolución demostrada, con los efectos sistemáticos controlados como en los experimentos con relojes ópticos, contradiría el relato del tiempo propio de la relatividad general.[3,5]
- Un experimento reproducible que identificara un sistema privilegiado en el que sucesos separados sean absolutamente simultáneos, compatible con los resultados nulos existentes, invalidaría la relatividad de la simultaneidad.[2]
- Una asimetría temporal demostrada en la dinámica fundamental capaz de dar cuenta de la flecha macroscópica observada, y no la asimetría temporal ya conocida en los procesos débiles que violan CP, eliminaría la necesidad de una explicación por condiciones de contorno.[6,7]

Si solo recuerdas una cosa

El tiempo en física es lo que acumulan los relojes a lo largo de su propio camino, y su dirección viene de cómo empezaron las cosas y no de las ecuaciones.

Artículos relacionados

- IDE-014 — Medición
- IDE-003 — Entropía
- IDE-023 — ¿Qué es la observación?

Referencias

[1] Bureau International des Poids et Mesures. The International System of Units (SI), 9th edition, updated 2026. DOI 10.59161/AUEZ1291.

- [2] Albert Einstein. On the Electrodynamics of Moving Bodies. *Annalen der Physik* 17, 891-921 (1905). DOI 10.1002/andp.19053221004.
- [3] Charles W. Misner; Kip S. Thorne; John Archibald Wheeler. *Gravitation*. W. H. Freeman (1973), chapters 1 and 25.
- [4] R. V. Pound; G. A. Rebka Jr. Apparent Weight of Photons. *Physical Review Letters* 4, 337-341 (1960). DOI 10.1103/PhysRevLett.4.337.
- [5] C. W. Chou; D. B. Hume; T. Rosenband; D. J. Wineland. Optical Clocks and Relativity. *Science* 329, 1630-1633 (2010). DOI 10.1126/science.1192720.
- [6] Huw Price. *Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*. Oxford University Press (1996).
- [7] Particle Data Group. CP Violation in the Quark Sector, in *Review of Particle Physics*, 2024 edition, revised August 2023 by T. Gershon and Y. Nir. <https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-cp-violation.pdf>