

Teoría del Tiempo Estructural (STT):

Una reinterpretación de la densidad causal en la física operativa

Marcel Acunya

17 de mayo de 2026

Resumen

Presentamos la Teoría del Tiempo Estructural (STT) como un replanteamiento conceptual orientado a ofrecer una alternativa a la interpretación del espacio-tiempo como un contenedor abstracto y pasivo. En lugar de formular una modificación empírica destinada a resolver anomalías cosmológicas particulares, STT explora la posibilidad de entender la gravedad y la evolución temporal como lecturas operativas diferenciadas de una organización causal subyacente.

La hipótesis central introduce el concepto de *densidad de ordenamiento causal*: una propiedad efectiva asociada al grado de estructuración causal entre eventos. Para proporcionar un anclaje covariante mínimo, se emplea un sector geométrico no propagante de tipo cuscudón, interpretado no como la densidad causal en sí misma, sino como un índice matemático de la foliación. Esta distinción permite mantener intacta la física operativa local mientras se reformula conceptualmente la relación entre materia masiva, propagación lumínica y tiempo propio.

Palabras clave: tiempo estructural, densidad causal, cuscudón, gravedad, foliación, relatividad general.

1. Introducción: el tiempo fuera del contenedor

En la física relativista contemporánea, la dependencia del ritmo temporal respecto al entorno gravitatorio y al estado de movimiento no es una especulación filosófica, sino un hecho experimental y operativo. Los sistemas de navegación orbital, como GPS, requieren correcciones relativistas asociadas tanto a la velocidad de los satélites como al potencial gravitatorio terrestre. Del mismo modo, los relojes atómicos de alta precisión permiten medir diferencias temporales producidas por cambios de altitud y movimiento relativo.

Tanto la dilatación temporal cinemática como la gravitacional emergen de una misma estructura geométrica: el tensor métrico $g_{\mu\nu}$. El tiempo propio no se define de forma absoluta, sino mediante el intervalo espacio-temporal,

$$d\tau^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu. \quad (1)$$

Esto sugiere que el tiempo, al menos en su forma físicamente medible, no actúa como una variable externa separada de la geometría, sino como una magnitud ligada a la estructura causal del espacio-tiempo.

La interpretación habitual tiende a describir el espacio-tiempo como un escenario donde los eventos simplemente ocurren. Esta imagen resulta útil, pero puede ocultar un aspecto más profundo: aquello que medimos como duración temporal depende de la organización geométrica que también determina la propagación causal y la gravitación.

El caso del fotón muestra esta tensión con especial claridad. Las partículas masivas acumulan tiempo propio a lo largo de sus trayectorias, mientras que la propagación lumínica ocupa el límite nulo de la descripción relativista,

$$d\tau^2 = 0. \quad (2)$$

El fotón no acumula tiempo propio y, aun así, su propagación sigue estando determinada por la estructura causal de la geometría. Su trayectoria puede curvarse y su frecuencia desplazarse en presencia de campos gravitatorios. Desde esta perspectiva, la gravedad y el tiempo propio no aparecen como entidades independientes que simplemente coexisten, sino como lecturas distintas de una organización causal común.

STT surge de esta observación. Su objetivo no es reemplazar la relatividad general ni introducir una nueva fuerza, sino explorar si la relación entre tiempo propio, gravedad y causalidad puede formularse como una propiedad estructural del ordenamiento causal del espacio-tiempo.

2. La hipótesis central: densidad causal e indexación

Postulamos que el espacio-tiempo puede describirse, a nivel conceptual, mediante una propiedad efectiva que denominamos *densidad de ordenamiento causal*: una medida del grado de estructuración causal entre eventos.

Esta hipótesis se sitúa cerca del territorio conceptual de los enfoques que toman la causalidad como estructura primaria, aunque STT no adopta una ontología discreta ni identifica la densidad causal con un conjunto causal en sentido estricto [5].

Bajo esta mirada, los fenómenos que denominamos gravedad y tiempo propio no se introducen como entidades independientes, sino como lecturas operativas distintas de dicha organización:

- STT interpreta la gravedad como una manifestación efectiva de gradientes en la organización causal.
- STT interpreta el tiempo propio como la evolución local de esa organización a lo largo de una trayectoria.

El fotón representa el límite nulo de esta descripción: una trayectoria para la cual no se acumula tiempo propio, aunque la propagación continúa estando determinada por la estructura causal de la geometría. En este sentido, el fotón no se sitúa «fuera» de la estructura temporal, sino en el límite donde la noción de tiempo propio deja de acumular evolución.

Esta lectura no pretende añadir una entidad física adicional al inventario ontológico de la relatividad. Más bien propone una reinterpretación: aquello que llamamos tiempo propio y aquello que medimos como gravedad podrían ser manifestaciones diferenciadas de una infraestructura causal común.

3. El formalismo mínimo y la limitación del índice

Para dotar a esta hipótesis de un anclaje covariante sin introducir modos escalares propagantes que alteren la física local validada, adoptamos el formalismo mínimo de un sector tipo cuscutón con acoplamiento mínimo [6]. Introducimos un campo escalar estructural, $\tau(x^\mu)$

$$g^{\mu\nu} \partial_\mu \tau \partial_\nu \tau < 0, \quad (3)$$

mediante la acción

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{M_{\text{Pl}}^2}{2} R + \mu^2 \sqrt{-g^{\mu\nu} \partial_\mu \tau \partial_\nu \tau} - V(\tau) \right] + S_m[g_{\mu\nu}, \psi]. \quad (4)$$

Definiendo

$$X \equiv -\frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\tau\partial_\nu\tau, \quad (5)$$

la raíz cinética puede escribirse como $\sqrt{2X}$. La normalización dimensional de τ y μ se entiende fijada por la elección de unidades del sector efectivo.

Es importante señalar una delimitación conceptual explícita: el campo τ no constituye la densidad causal en sí misma. Funciona como un índice matemático que parametriza una foliación.

El objeto físico que STT intenta conceptualizar —la densidad de ordenamiento causal— no queda identificado directamente con el campo escalar. La variable τ solo permite describir formalmente una familia de hipersuperficies cuya organización se rige por una ecuación de restricción elíptica.

Definimos el vector normal a la foliación como

$$u^\mu \equiv \frac{\partial^\mu\tau}{\sqrt{-\partial_\alpha\tau\partial^\alpha\tau}}. \quad (6)$$

La variación respecto a τ conduce a

$$\nabla_\mu u^\mu = \frac{V_{,\tau}}{\mu^2}, \quad (7)$$

donde $V_{,\tau} \equiv dV/d\tau$.

Esta ecuación no describe una onda escalar propagante; actúa como una restricción geométrica sobre la foliación. En consecuencia, el formalismo no introduce una nueva partícula en el espectro ni modifica por sí mismo los conos de luz de la materia acoplada mínimamente.

La matemática utilizada no agota el contenido conceptual de STT. Más bien proporciona una representación mínima y controlada: permite indexar formalmente una organización causal sin afirmar que el índice τ sea la sustancia física del tiempo.

4. Salvaguarda de consistencia operativa

La física operativa local está ampliamente validada por experimentos de laboratorio, observaciones del Sistema Solar, relojes atómicos, sistemas orbitales y medidas de propagación lumínica. Por ello, cualquier reinterpretación de la estructura temporal debe ser compatible con el límite relativista estándar.

En el formalismo adoptado, la variación respecto a τ no propaga información de manera independiente. La función $V(\tau)$ no debe interpretarse aquí como una sustancia física adicional en sentido ontológico, sino como una parametrización efectiva de la estructura macroscópica asociada a la foliación.

En el régimen cuasiestático y de alto momento espacial, la respuesta del sector no propagante queda suprimida. Esto permite que la gravedad efectiva tienda al valor newtoniano estándar,

$$G_{\text{eff}} \rightarrow G_N, \quad (8)$$

y que el deslizamiento gravitacional tienda al valor relativista,

$$\eta \rightarrow 1. \quad (9)$$

Estos límites no se presentan como predicciones empíricas competitivas, sino como una condición mínima de inocuidad: la reinterpretación estructural propuesta no debe alterar los resultados experimentales consolidados en el régimen local.

La función del formalismo es, por tanto, doble. Por un lado, proporciona un lenguaje covariante para indexar la organización causal. Por otro, actúa como salvaguarda de consistencia, mostrando cómo una lectura estructural del tiempo puede formularse sin romper la física operativa ya validada.

5. Conclusión

La Teoría del Tiempo Estructural propone una reinterpretación de la relación entre gravedad, tiempo propio y causalidad. Su hipótesis central es que estos fenómenos podrían entenderse como lecturas operativas distintas de una organización causal subyacente, descrita conceptualmente como densidad de ordenamiento causal.

El papel del formalismo matemático no es sustituir a la relatividad general ni añadir una nueva sustancia física al universo. Su función es proporcionar un anclaje mínimo para expresar, de manera covariante, una intuición conceptual: el tiempo propio y la gravedad quizá no sean entidades separadas, sino manifestaciones diferenciadas de la estructura causal que organiza los eventos.

STT no pretende demostrar de forma definitiva esta hipótesis en su formulación actual. Su objetivo es más modesto: formularla de manera clara, distinguir el concepto físico del índice matemático utilizado para representarlo, y mostrar que dicha reinterpretación puede plantearse sin contradecir inmediatamente la física operativa local.

Referencias

- [1] A. Einstein, *Die Feldgleichungen der Gravitation*, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, 844–847 (1915).
- [2] H. Minkowski, *Raum und Zeit*, Physikalische Zeitschrift **10**, 75–88 (1909).
- [3] C. W. Misner, K. S. Thorne y J. A. Wheeler, *Gravitation*, W. H. Freeman (1973).
- [4] R. M. Wald, *General Relativity*, University of Chicago Press (1984).
- [5] L. Bombelli, J. Lee, D. Meyer y R. D. Sorkin, *Space-Time as a Causal Set*, Phys. Rev. Lett. **59**, 521–524 (1987).
- [6] N. Afshordi, D. J. H. Chung y G. Geshnizjani, *Cuscuton: A causal field theory with an infinite speed of sound*, Phys. Rev. D **75**, 083513 (2007).
- [7] C. M. Will, *The Confrontation between General Relativity and Experiment*, Living Rev. Relativity **17**, 4 (2014).