

RESUMEN EJECUTIVO

Modelo TIDE: Memoria Geométrica en gravedad Einstein–Cartan

Introducción

El modelo **TIDE** (Torsion from non-relaxation) propone que una parte sustancial de los fenómenos atribuidos al sector oscuro no corresponde a nuevas formas de materia o energía, sino a una **respuesta geométrica efectiva del espacio-tiempo cuando éste no se encuentra completamente relajado**. El marco teórico es conservador: TIDE se formula dentro de la gravedad **Einstein–Cartan–Sciama–Kibble (ECSK)**, no introduce campos propagantes adicionales, no modifica la cosmología temprana y recupera exactamente la Relatividad General en el límite de equilibrio.

La idea central es simple pero no habitual: **la geometría del espacio-tiempo puede tener memoria dinámica**. Tras procesos como colapso jerárquico, fusiones o virialización, la conexión geométrica no necesariamente relaja de forma instantánea al régimen Levi-Civita. Durante ese estado fuera de equilibrio, emerge una **torsión efectiva no propagante**, algebraicamente determinada, que modifica el campo gravitatorio sin introducir nuevos grados de libertad.

Analogía física: memoria geométrica en sistemas con relajación finita

Para visualizar el mecanismo, puede pensarse en un colchón viscoelástico. Al aplicar una carga y retirarla, la geometría del material no vuelve instantáneamente a su estado original: persiste una deformación residual que decae en el tiempo. Durante ese intervalo, **la geometría residual permite inferir una “masa aparente”**, aun cuando la fuente real ya no está presente.

TIDE propone algo análogo en el espacio-tiempo: en regiones con historia dinámica, la geometría conserva memoria de perturbaciones pasadas y responde de forma efectiva como si existiera una fuente adicional. Esa fuente no es una sustancia nueva, sino **la propia geometría regulándose para estabilizarse**.

Ecuación madre y mecanismo físico

El núcleo del modelo es una ecuación de relajación tipo Maxwell para la distorsión de la conexión:

$$\frac{D\Delta\Gamma}{D\tau} + \frac{1}{\tau} \Delta\Gamma = S_{\mu\nu},$$

donde

$\Delta\Gamma$ mide la desviación respecto de la conexión Levi-Civita,

τ es un tiempo efectivo de relajación geométrica y,

$S_{\mu\nu}$ representa fuentes dinámicas (shear, tidal stress, fusiones).

A partir de esta dinámica se construye un escalar de no-relajación (INR) que controla algebraicamente la torsión efectiva. **No se introducen parámetros cosmológicos libres: las constantes involucradas actúan como escalas constitutivas fijas.**

Mapa operacional

En el régimen de interés (estructuras no lineales y líneas de visión complejas), TIDE propone un **exceso gravitatorio aparente** inducido por memoria geométrica, sin introducir nueva materia.

Operacionalmente:

- **Entrada física (driver):** historia dinámica / no-relajación (fusiones, shear, tidal stress, flujos anisotrópicos).
- **Variable de control:** escalar de no-relajación **INR** (covariante, $INR \geq 0$, $INR \rightarrow 0$ en equilibrio).
- **Salida geométrica:** torsión efectiva **no propagante** (algebraicamente determinada) que modifica el campo gravitatorio inferido.
- **Límite GR protegido:** cuando $INR \rightarrow 0$, la torsión efectiva se anula y se recupera GR exactamente.

Este mapa permite tests directos: si el exceso gravitatorio correlaciona con historia dinámica acumulada y no con densidad instantánea, se favorece el mecanismo propuesto.

Régimen de validez y consistencia cosmológica

- **Universo temprano (CMB, BBN):** La geometría está relajada ($INR \rightarrow 0$). TIDE recupera exactamente GR. El CMB y la cosmología temprana permanecen intactos.
- **Vacíos cósmicos:** Baja densidad / complejidad dinámica \Rightarrow torsión 0. La gravedad es Einsteiniana.
- **Estructuras virializadas:** Historia dinámica compleja $\Rightarrow INR > 0 \Rightarrow$ torsión efectiva. Aparece un exceso gravitatorio aparente.

Interpretación del sector oscuro

En este marco:

- **Materia Oscura (CDM):** Es una **respuesta geométrica efectiva** del espacio-tiempo fuera de equilibrio en estructuras virializadas. Λ CDM describe correctamente este régimen, pero de forma fenomenológica.
- **Energía Oscura (DE):** Se interpreta como una contribución geométrica efectiva asociada a la relajación incompleta del espacio-tiempo a gran escala, sin introducir un fluido exótico.
- **Tensiones de H_0 y S_8 :** Emergen naturalmente como efectos ambientales y geométricos, sin requerir nueva física temprana.

Tests realizados y preferencia estadística

El marco TIDE ha sido confrontado con observables independientes y de distinta naturaleza, incluyendo:

- la evolución del lensing fuerte $R(z) = M_{\text{Ein}}/M_{\ast}$ desde $z \sim 0.1$ hasta $z \sim 3$,
- sistemas no relajados y colisiones de cúmulos tipo *Bullet Cluster*,
- análisis bayesianos de selección de modelos que penalizan explícitamente la complejidad paramétrica (BIC),
- tests causales directos en lentes gravitacionales, basados en correlaciones parciales, *bootstrap* y *permutation tests*, que distinguen entre dependencia con masa instantánea e historia dinámica,
- comparaciones en igualdad de condiciones con Λ CDM, MOND y teorías $f(R)$.

En todos los casos en los que se penaliza correctamente el *overfitting* y se exige consistencia física entre escalas, TIDE emerge como el único marco capaz de reproducir los datos sin introducir grados de libertad *ad hoc*, manteniendo coherencia entre galaxias, cúmulos y observables cosmológicos donde los modelos alternativos fallan o requieren ajustes empíricos independientes.

Evidencia mínima reproducible (qué está disponible hoy)

El estado actual del programa TIDE incluye evidencia observacional ya testeada con datasets públicos, y un conjunto mínimo de resultados que pueden ser re-analizados por terceros sin modificar la teoría:

- **Lentes gravitacionales:** evolución y ordenamiento del exceso gravitatorio inferido con redshift y/o entorno, con tests de robustez (*bootstrap*, permutaciones, controles).
- **Estructura a gran escala:** señal ambiental en residuales de expansión (ordenamiento monótono por entorno) con tests no paramétricos.
- **Sistemas no relajados (mergers):** interpretación geométrica de offsets gas–potencial como memoria (casos tipo Bullet Cluster).

Predicciones falsables

El marco TIDE conduce a un conjunto claro de predicciones observacionales, directamente contrastables:

- Saturación del efecto tipo “materia oscura” en galaxias tempranas no completamente virializadas ($z \gtrsim 1.5$),
- Dependencia del exceso de lensing con la historia dinámica acumulada del sistema, y no únicamente con la densidad o masa instantánea,
- Aparición de gradientes ambientales en la expansión local, incluyendo variaciones sistemáticas de H_0 ,
- Supresión o ausencia sistemática de efectos tipo CDM en vacíos profundos y regiones de baja no-linealidad.

Cada una de estas predicciones es **falsable**, no acomodable, y permite tests independientes con datasets actuales y futuros (JWST, DESI, Euclid, Rubin), proporcionando criterios claros para validar o refutar el marco propuesto.

Estado del marco

Para una evaluación científica honesta, es importante separar lo que ya está establecido de lo que aún requiere desarrollo formal.

Cerrado (en el nivel efectivo propuesto):

- Formulación dentro de **ECSK** sin campos propagantes nuevos y con **límite GR exacto**.
- Interpretación del “sector oscuro” como **respuesta geométrica efectiva** en regímenes no relajados.
- Existencia de **predicciones observacionales** testables con datos actuales.

Abierto (y prioritario para trabajo con grupos expertos):

- Derivación microscópica completa del **cierre constitutivo** (forma exacta de la respuesta efectiva y del driver covariante).
 - Implementación y testeo sistemático en pipelines estándar de cosmología (Boltzmann + LSS) bajo hipótesis controladas.
 - Simulaciones independientes (N-body / ray-tracing) que cuantifiquen el régimen de validez y posibles degeneraciones con sistemáticos.
-

Conclusión

TIDE **no reemplaza Λ CDM: lo completa**. Proporciona el mecanismo geométrico subyacente que explica por qué el espacio-tiempo se comporta *como si* existiera materia oscura y energía oscura, **solo cuando y donde la historia dinámica lo exige**.

Es una extensión conservadora, geométrica y falsable de la Relatividad General. Y ofrece una interpretación física unificada del sector oscuro basada en memoria geométrica.

Qué se pide explícitamente a la comunidad

Se solicitan en particular:

- **Re-análisis independiente** de los tests (lentes, LSS, clusters) con pipelines alternativos y controles de sistemáticos.
- **Simulaciones** (N-body y ray-tracing) que implementen una respuesta geométrica efectiva no-propagante activada por no-relajación, y comparen contra Λ CDM en igualdad de condiciones observacionales.
- **Evaluación teórica** del cierre constitutivo (qué es derivable en ECSK y qué es estrictamente fenomenológico), con énfasis en consistencia covariante y límites.

APÉNDICE A

Derivación efectiva del marco TIDE desde gravedad Einstein–Cartan

A.1 Alcance

Este apéndice presenta la formulación matemática del marco TIDE a partir de la teoría de Einstein–Cartan–Sciama–Kibble (ECSK), con el objetivo de:

- explicitar el origen geométrico del mecanismo propuesto,
- identificar los supuestos introducidos tras el coarse–graining,
- separar con claridad los resultados derivados de ECSK de los elementos fenomenológicos,
- proporcionar una base técnica para análisis independientes.

El contenido de este apéndice no es necesario para la lectura del documento principal.

A.2 Marco microscópico: Einstein–Cartan–Sciama–Kibble

A.2.1 Acción y variables

La teoría ECSK extiende la Relatividad General permitiendo una conexión afín con torsión independiente del tensor métrico. La acción se escribe como

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} \tilde{R}(g, \tilde{\Gamma}) + \int d^4x \sqrt{-g} \mathcal{L}_{\text{matter}}[\psi, g_{\mu\nu}, \tilde{\Gamma}_{\mu\nu}^\lambda],$$

donde \tilde{R} es el escalar de Ricci construido a partir de la conexión completa $\tilde{\Gamma}_{\mu\nu}^\lambda$.

A.2.2 Descomposición de la conexión

La conexión se descompone como

$$\tilde{\Gamma}_{\mu\nu}^\lambda = \Gamma_{\mu\nu}^\lambda(g) + K_{\mu\nu}^\lambda,$$

donde $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda(g)$ es la conexión de Levi–Civita y

$K_{\mu\nu}^\lambda$ es el tensor de contorsión.

La torsión se define como

$$T_{\mu\nu}^\lambda = 2\tilde{\Gamma}_{[\mu\nu]}^\lambda,$$

y está relacionada algebraicamente con $K_{\mu\nu}^\lambda$.

A.2.3 Ecuaciones de campo

La variación de la acción respecto del métrico conduce a ecuaciones de Einstein construidas con la conexión completa.

La variación respecto de $\tilde{\Gamma}_{\mu\nu}^\lambda$ da lugar a

$$T_{\mu\nu}^\lambda = 8\pi G S_{\mu\nu}^\lambda,$$

donde $S_{\mu\nu}^\lambda$ es la densidad de momento angular intrínseco (spin).

En ausencia de polarización macroscópica,
 $\langle S_{\mu\nu}^\lambda \rangle = 0$, y la solución de equilibrio coincide con GR.

A.3 Limitaciones del coarse-graining estándar

En el tratamiento usual se asume que, tras promediar el spin microscópico, la conexión relaja instantáneamente a la conexión de Levi-Civita.

Este paso no se sigue necesariamente de las ecuaciones de campo.

La conexión es un objeto geométrico dinámico. La anulación de la fuente no implica relajación instantánea del campo geométrico asociado.

A.4 Dinámica efectiva de relajación geométrica

A.4.1 Distorsión de la conexión

Se define la distorsión geométrica como

$$D_{\mu\nu}^\lambda \equiv \tilde{\Gamma}_{\mu\nu}^\lambda - \Gamma_{\mu\nu}^\lambda(g).$$

En GR, $D_{\mu\nu}^\lambda = 0$. En configuraciones fuera de equilibrio,
 $D_{\mu\nu}^\lambda$ puede ser distinto de cero.

A.4.2 Ecuación de relajación

Se introduce una ecuación efectiva de relajación de la forma

$$u^\sigma \nabla_\sigma D_{\mu\nu}^\lambda + \frac{1}{\tau} D_{\mu\nu}^\lambda = S_{\mu\nu}^\lambda,$$

donde τ es un tiempo característico de relajación geométrica y
 $S_{\mu\nu}^\lambda$ representa fuentes geométricas dinámicas
(asociadas a historia tidal, shear o gradientes de curvatura).

Esta ecuación es local, causal y no introduce grados de libertad propagantes adicionales.

A.4.3 Relación con torsión

A orden lineal en la teoría efectiva,

$$K_{\mu\nu}^\lambda \simeq D_{\mu\nu}^\lambda, T_{\mu\nu}^\lambda \simeq 2D_{[\mu\nu]}^\lambda.$$

La torsión macroscópica aparece entonces como una consecuencia de no-relajación geométrica residual.

A.5 Escalar de no-relajación

Se introduce el escalar covariante

$$I_{\text{NR}} = \frac{1}{L_0} \sqrt{g^{\mu\nu} D_\mu D_\nu + \tau^2 g^{\mu\nu} \dot{D}_\mu \dot{D}_\nu},$$

donde $D_\mu = D_{\mu\lambda}^\lambda$ y
 $\dot{D}_\mu = u^\sigma \nabla_\sigma D_\mu$.

Este escalar satisface:

- $I_{\text{NR}} \geq 0$,
 - $I_{\text{NR}} \rightarrow 0$ en equilibrio,
 - independencia explícita de la densidad instantánea.
-

A.6 Cierre constitutivo efectivo

Se adopta un cierre algebraico de la forma

$$K_{\mu\nu}^\lambda = D_{\mu\nu}^\lambda F(I_{\text{NR}}), F(0) = 0.$$

La existencia de un cierre escalar es consistente con el carácter algebraico de la torsión en ECSK.
La forma funcional de F no se deriva de primeros principios.

Una elección compatible con los datos observacionales es

$$F(I_{\text{NR}}) = \xi_0 \tanh \left(\frac{I_{\text{NR}}}{I_*} \right).$$

A.7 Consecuencias observables

En el límite Newtoniano, la contorsión introduce una modificación efectiva del potencial gravitatorio,

$$\Phi_{\text{eff}} = \Phi_{\text{Newton}} \times R,$$

donde R depende de I_{NR} , del entorno y del tiempo desde la última perturbación dinámica significativa.

El exceso gravitatorio se anula en vacíos, en el universo temprano y tras relajación completa.

A.8 Consistencia formal

- **Causalidad:** la ecuación de relajación es local y no hiperbólica.
 - **Estabilidad:** perturbaciones libres decaen exponencialmente.
 - **Límite GR:** $I_{\text{NR}} \rightarrow 0 \Rightarrow K_{\mu\nu}^{\lambda} \rightarrow 0$.
 - **No equivalencia con teorías $f(R)$:** no se introducen ecuaciones de orden superior ni campos propagantes adicionales.
-

A.9 Estado del marco

Derivado:

- formulación ECSK,
- carácter algebraico de la torsión,
- definición de la distorsión geométrica,
- existencia de una variable escalar de no-relajación,
- recuperación exacta de GR en equilibrio.

Fenomenológico:

- forma funcional de $F(I_{\text{NR}})$,
- valor del tiempo de relajación τ ,
- forma explícita del término $S_{\mu\nu}^{\lambda}$.

Estos puntos definen el programa abierto de desarrollo teórico.

A.10 Comentario final

El marco TIDE constituye una extensión efectiva de ECSK aplicable a sistemas fuera de equilibrio geométrico.

La teoría es falsable: la ausencia sistemática de correlación entre exceso gravitatorio e historia dinámica descartaría el mecanismo propuesto.

Fin del Apéndice A