

LBCU y K-rate Canónico: del Triángulo de Falsación a un Sistema de Calibración Inter-Escalas (TCDS)

Genaro Carrasco Ozuna — Teoría Cromodinámica Sincrónica (TCDS)

3 de noviembre de 2025

Resumen

Se formaliza el *Triángulo de Falsación Calibrado* (Neutrinos–Relojes–Banco FET) bajo dos ejes: el **LBCU** (Límite de Banda Causal Universal) como principio axiomático que limita la propagación de fase/coherencia, y el **K-rate canónico** K_y como KPI dinámico de rigidez de fase medido en laboratorio. El método deja de ser una verificación de consistencia cualitativa para convertirse en una *calibración de parámetros absolutos*: el valor numérico de Σ inferido desde el FET (vía K_y) debe predecir la corrección de fase en neutrinos ε_Σ y el corrimiento de frecuencia en relojes $\delta f/f$, mediante mapas de transferencia causales \mathcal{T}_ν y \mathcal{T}_{clk} que respetan el LBCU. Se establecen ecuaciones operativas, umbrales -metrics y una matriz de veredicto binaria con falsación por *descalibración*.

1. LBCU: Límite de Banda Causal Universal

En TCDS, el LBCU no es sólo c como límite de velocidad, sino el *límite de transporte de información de fase/coherencia*. Modelamos Σ como campo coherencial con ecuación efectiva hiperbólica (onda/dispersiva controlada):

$$\partial_t^2 \Sigma - v_\Sigma^2 \nabla^2 \Sigma + \gamma_\Sigma \partial_t \Sigma + \partial_\Sigma V_{\text{eff}} = Q - \phi, \quad (1)$$

donde $0 < v_\Sigma \leq c$, $\gamma_\Sigma \geq 0$ y V_{eff} deriva del sector (Σ, χ) . El **LBCU** impone las cotas:

$$(i) \text{ Causalidad de grupo: } v_{g,\Sigma}(\omega) = \frac{d\omega}{dk} \leq c, \quad (2)$$

$$(ii) \text{ Retardo de fase positivo: } \tau_\Sigma(\omega) = \frac{d \arg H_\Sigma(\omega)}{d\omega} \geq 0, \quad (3)$$

$$(iii) \text{ Ancho de banda coherencial: } B_\Sigma \leq B_{\max}(c, \gamma_\Sigma, \text{granularidad CGA}). \quad (4)$$

Estas cotas actúan como *guardarrailles* físicos para toda proyección inter-escalas (laboratorio \rightarrow neutrinos/relojes).

2. K-rate canónico K_y : definición y estimador

En el banco FET/SYNCTRON, definimos K_y como *tasa de rigidez de fase* normalizada del proceso bloqueado:

$$K_y \equiv \frac{1}{T} \int_0^T \frac{|\dot{\varphi}(t)|}{\omega_\Sigma} dt \quad \text{con} \quad \omega_\Sigma = 2\pi f_\Sigma^*, \quad (5)$$

donde $\varphi(t)$ es la fase instantánea (Hilbert/PLL), f_Σ^* es la frecuencia de referencia coherencial (del banco), y T la ventana de captura. **-metrics de aceptación (KPIs)**:

$$\text{LI} \geq 0,90, \quad R(t) \geq 0,95, \quad \text{RMSE}_{SL} < 0,10, \quad \text{reproducibilidad} \geq 95\%.$$

Con locking alto, K_y mide *curvatura/dureza de fase*: cuanto menor K_y , mayor robustez coherencial; si LI es alto pero K_y grande, el estado es inestable/ruidoso.

3. Contrato de Escala: mapas de transferencia causales

Sea $\hat{\Sigma}$ el *amplitud/coordenada de coherencia* inferida localmente desde K_y . Definimos el **Contrato de Escala** como el par de mapas causales (respetando LBCU):

$$\varepsilon_\Sigma = \mathcal{T}_\nu(K_y; L, E, \text{trayectoria, medio}), \quad (6)$$

$$\frac{\delta f}{f} = \mathcal{T}_{\text{clk}}(K_y; \text{modo de cavidad/reloj, ambiente}), \quad (7)$$

con ε_Σ la *corrección fraccional* a la fase de oscilación de neutrinos (entra como $\Delta m_{\text{eff}}^2 = \Delta m^2[1+\varepsilon_\Sigma]$) y $\delta f/f$ el corrimiento coherencial en relojes/cavidades.

Forma mínima (linealizada, falsable). Bajo variaciones suaves y causalidad dispersiva, proponemos *ansatz* linealizado:

$$\varepsilon_\Sigma \simeq \alpha_\nu K_y \cdot \underbrace{\mathcal{G}_\nu(L, E; \text{MSW}, v_\Sigma, \gamma_\Sigma)}_{\text{ganancia causal}}, \quad (8)$$

$$\frac{\delta f}{f} \simeq \alpha_{\text{clk}} K_y \cdot \underbrace{\mathcal{G}_{\text{clk}}(\omega_{\text{mode}}; v_\Sigma, \gamma_\Sigma)}_{\text{ganancia causal}}, \quad (9)$$

donde $\alpha_\nu, \alpha_{\text{clk}}$ son coeficientes de transferencia *calibrados una sola vez* en laboratorio (y fijados por LBCU al exigir $\tau_\Sigma \geq 0, v_g \leq c$). \mathcal{G}_ν incluye dependencia L, E (long-baseline, efecto tipo MSW generalizado por Σ); \mathcal{G}_{clk} depende del modo resonante y del espectro coherencial acoplado.

4. Predicción numérica y falsación por descalibración

Protocolo:

1. **Banco FET (ground truth).** Medir K_y bajo KPIs aceptados; pre-registrar $(\alpha_\nu, \alpha_{\text{clk}}, v_\Sigma, \gamma_\Sigma)$ y \mathcal{G} .
2. **Proyección a neutrinos/relojes.** Con K_y fijo, predecir $\varepsilon_\Sigma^{\text{pred}}$ y $(\delta f/f)^{\text{pred}}$ con incertidumbre propagada (bootstrap + priors causales LBCU).
3. **Medición y veredicto.** Comparar con $\varepsilon_\Sigma^{\text{obs}}$, $(\delta f/f)^{\text{obs}}$.

Matriz de veredicto (binaria):

Vértice	Métrica	Medido	Predicho (desde K_y)	Veredicto
Banco FET	K_y	A	—	Ground truth
Neutrinos	ε_Σ	B	$C = \alpha_\nu K_y \mathcal{G}_\nu$	$B \approx C$ (C) / $B \not\approx C$ (F)
Relojes	$\delta f/f$	D	$E = \alpha_{\text{clk}} K_y \mathcal{G}_{\text{clk}}$	$D \approx E$ (C) / $D \not\approx E$ (F)

Umbrales de decisión. Aceptamos “ \approx ” si $|B - C| \leq 3\sigma$ y $|D - E| \leq 3\sigma$ con σ total (instrumental + modelo LBCU). Cualquier ruptura del *Contrato de Escala* implica **falsación por descalibración**.

5. Ejemplo operativo (orden de magnitud)

Supongamos $K_y = 1,0 \times 10^{-4}$ (estado bloqueado robusto), $\alpha_\nu \mathcal{G}_\nu = 1,0 \times 10^{-7}$, $\alpha_{\text{clk}} \mathcal{G}_{\text{clk}} = 1,0 \times 10^{-13}$. Entonces:

$$\varepsilon_\Sigma^{\text{pred}} = 10^{-11}, \quad \left(\frac{\delta f}{f} \right)^{\text{pred}} = 10^{-17}.$$

Criterio: DUNE/Hyper-K deben ser sensibles a $\varepsilon_\Sigma \sim 10^{-11}$ en campañas integradas; relojes ópticos/coherentes deben alcanzar 10^{-17} relativo coincidente temporalmente. Si cualquiera cae fuera de 3σ con K_y confirmado, **F**.

6. LBCU como navaja de Ockham causal

El LBCU *reduce la libertad de ajuste* imponiendo: (i) $\tau_\Sigma \geq 0$ (no “avances” no causales en relojes), (ii) $v_g \leq c$ (prohibición de atajos en neutrinos), (iii) B_Σ finito (no se puede inyectar poder coherencial infinito desde el FET a otras escalas). Así, $\alpha_\nu, \alpha_{\text{clk}}$ quedan fuertemente acotados por *consistencia causal*, no por ajuste ad hoc.

7. Autocrítica y protocolo de aseguramiento

Identificabilidad. ε_Σ puede mimetizar sistemáticos (L, E); mitigamos con *covariables causales* (dirección, densidad de medio, calendario) y *coincidencia temporal* con campañas de relojes.

Consistencia dimensional. K_y es adimensional por normalización ω_Σ (evita unidades arbitrarias); las ganancias \mathcal{G} se reportan con unidades claras (long-baseline, modos de cavidad).

Pruebas nulas. (i) FET “off-locking”: K_y no informativo \Rightarrow predicciones deben colapsar a cero dentro de ruido; (ii) inversión de fase/apantallamiento: descartar acoplos EM; (iii) *hold-out* de calibración: α fijadas en época 1, validadas en época 2.

Cómo validé la conclusión. (1) Cerré cada puente con ecuación falsable (Eqs. (6)–(7)); (2) Garante LBCU con $\tau_\Sigma \geq 0, v_g \leq c, B_\Sigma$ finito; (3) Evité “libertad escondida” fijando $\alpha_\nu, \alpha_{\text{clk}}$ por pre-registro; (4) Exigí *triple coincidencia numérica* $K_y \rightarrow \{\varepsilon_\Sigma, \delta f/f\}$; (5) Declaré rutas de falsación por *ausencia* y por *descalibración*.

8. Conclusión

El LBCU + K_y transforman el Triángulo de Falsación en un *sistema de veredicto universal* cuantitativo: un único número K_y (bajo KPIs) *debe* reproducir los números medidos en neutrinos y relojes, dentro de cotas causales. Si no, la hipótesis acoplada se descarta sin ambages. Esto eleva la TCDS de consistencia conceptual a **instrumento de calibración inter-escalar**.