Neutrinos como Corriente de Fase Causal Mínima

Acoplo al Campo de Sincronización Lógica Σ, Geodésicas Σ y Consecuencias Observables

Teoría Cromodinámica Sincrónica (TCDS) — Estudio matemático–científico con ruta de falsación

Versión 1.0 — 3 de noviembre de 2025

Resumen

Se formaliza la hipótesis TCDS de que los neutrinos representan el límite operativo de *coherencia marginal*, esto es, una *corriente de fase causal mínima* propagándose sobre el campo de Sincronización Lógica Σ. Partimos del sector lagrangiano mínimo (Σ, χ) y extendemos el acoplo al sector leptónico con términos derivativos suprimidos por una escala Λ, salvaguardando la fenomenología del Modelo Estándar. Introducimos una métrica conforme $g^{(\Sigma)}_{\mu\nu} = e^{2\kappa\Sigma}\eta_{\mu\nu}$ que curva *geodésicas* Σ y derivamos correcciones a las fases de oscilación de neutrinos: $\Delta\Phi = \Delta\Phi_{\text{vac}} + \Delta\Phi_{\Sigma}$. Mostramos cómo $\Delta\Phi_{\Sigma}$ puede escribirse con un funcional local $\mathcal{S}[\Sigma]$ (análogo MSW generalizado), proponemos observables, cotas de positividad y un plan de falsación escalonado (long-baseline, relojes/cavidades, FET), junto con KPIs -metrics (LI, $R(t)$, RMSE_{SL}, κ_{Σ}). Se cierra con una autocrítica explícita de supuestos, riesgos y vías de refutación.

1. Ontología Q–Σ–ϕ–χ y el papel del neutrino

En TCDS, la persistencia ontológica obedece al balance $Q - \phi$ sobre el sustrato χ, con Σ como coordenada informacional de coherencia. Proponemos:

Postulado operativo: *el neutrino es el límite fermiónico de existencia con* coherencia marginal,

donde el empuje cuántico Q apenas supera la fricción ϕ, dando lugar a un *transporte de fase causal* más que de energía. Su débil interacción material (SM) se complementa con un acoplo Σ-inducido extremadamente pequeño, responsable de una modulación de fase coherencial.

2. Formalismo lagrangiano mínimo y acoplos

2.1. Sector Σ–χ y ruptura espontánea

Tomamos el sector mínimo (EFT) con ruptura espontánea:

$$\mathcal{L}_{\Sigma\chi} = \frac{1}{2}(\partial\Sigma)^2 + \frac{1}{2}(\partial\chi)^2 - \Big[-\frac{1}{2}\mu^2\Sigma^2 + \frac{\lambda}{4}\Sigma^4 \Big] - \frac{1}{2}m_\chi^2\chi^2 - \frac{g}{2}\Sigma^2\chi^2, \tag{1}$$

con vacío $\Sigma_0 = \mu/\sqrt{\lambda}$ y excitación escalar σ (Sincronón) tras $\Sigma = \Sigma_0 + \sigma$.

2.2. Acoplo conservador al sector neutrínico

Para neutrinos de dos sabores (extensión a 3 es inmediata), adoptamos:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_\nu = {} & \sum_{i=1,2} \bar{\nu}_i(i\partial - m_i)\nu_i + \mathcal{L}_{\text{mix}} \\ & + \underbrace{\frac{c_V}{\Lambda}\,(\partial_\mu\Sigma)\,\bar{\nu}\gamma^\mu\gamma^5\nu}_{\text{acoplo derivativo, pseudoescalar}} + \underbrace{y_\nu\,\frac{\sigma}{\Lambda}\,\bar{\nu}\nu}_{\text{portal escalar suprimido}} + \mathcal{O}(\Lambda^{-2}),\end{aligned} \tag{2}$$

donde $\nu = (\nu_1, \nu_2)^T$, Λ es la escala de supresión y c_V, y_ν son coeficientes adimensionales. **Racional:** (i) el acoplo derivativo respeta un *shift* aproximado $\Sigma \to \Sigma + \text{cte}$ y no perturba masas; (ii) el portal escalar está adicionalmente suprimido. Así, la fenomenología estándar de oscilaciones se preserva al orden líder y se agregan *correcciones controladas*.

3. Geodésicas Σ y propagación de fase

El *ansatz conforme mínimo* consistente con el vínculo curvatura–coherencia es:

$$g^{(\Sigma)}_{\mu\nu}(x) = e^{2\kappa\Sigma(x)}\,\eta_{\mu\nu}, \qquad \kappa \text{ pequeño.} \tag{3}$$

La fase cuasi-clásica acumulada por un modo con cuatro-momento p_μ a lo largo de una curva Γ es

$$\Phi = \int_\Gamma p_\mu\,dx^\mu \;\;\Rightarrow\;\; \Phi_\Sigma = \frac{1}{2}\int_\Gamma p^\mu p^\nu\,\partial_\Sigma g^{(\Sigma)}_{\mu\nu}\,\delta\Sigma\,d\lambda \;\approx\; \kappa\int_\Gamma (p\cdot p)\,\delta\Sigma\;d\lambda, \tag{4}$$

donde hemos linealizado en $\kappa\Sigma$. Para neutrinos relativistas $p\cdot p \simeq m^2$, con m efectivo de cada autoestado.

4. Fase de oscilación: extensión tipo MSW por Σ

En el vacío, $\Delta\Phi_{\mathrm{vac}} = \frac{\Delta m^2}{2E}L$, con $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$, E energía y L la distancia. En TCDS, el Hamiltoniano efectivo en la base de sabores $\{\nu_e, \nu_\mu\}$ recibe dos contribuciones:

$$H = \frac{1}{2E}\,U\begin{pmatrix} m_1^2 & 0 \\ 0 & m_2^2 \end{pmatrix}U^\dagger \;+\; V_{\mathrm{MSW}}(n_e) \;+\; V_\Sigma[\Sigma], \tag{5}$$

donde U es la matriz de mezcla, $V_{\mathrm{MSW}}(n_e)$ el potencial de materia estándar, y

$$V_\Sigma[\Sigma] = \frac{c_V}{\Lambda}\Big(\partial_0\Sigma\,\not{\mathbb{1}} - \vec{\alpha}\cdot\nabla\Sigma\Big) \;+\; \frac{y_\nu\,\sigma}{\Lambda}\,\not{\mathbb{1}} \;+\; \mathcal{O}(\Lambda^{-2}). \tag{6}$$

Promediando sobre helicidad y direcciones (trayectorias largas) el término vectorial espacial se suprime y queda un *desplazamiento escalar común* y, si σ es inhomogénea, pequeñas diferencias entre autoestados. La **corrección de fase coherencial** se escribe como

$$\boxed{\Delta\Phi_\Sigma = \int_0^L \frac{\Delta m^2_{\mathrm{eff}}(x)}{2E}\,dx \quad \text{con} \quad \Delta m^2_{\mathrm{eff}}(x) = \Delta m^2\,[1+\varepsilon_\Sigma(x)]} \tag{7}$$

y $\varepsilon_\Sigma(x) \simeq \kappa\,\delta\Sigma(x) + \frac{\delta V_\Sigma(x)}{\Delta m^2}$ representa la *modulación por coherencia.* Si Σ varía lentamente, ε_Σ induce una deriva adiabática del ángulo de mezcla efectivo $\theta \to \theta_{\mathrm{eff}}(x)$; si no–adiabática, pueden aparecer *transiciones de fase* (LZ) adicionales controladas por $\dot{\Sigma}$.

Límite operativo (cierre con datos). Exigimos $|\Delta\Phi_\Sigma| \lesssim 0{,}1\,\Delta\Phi_{\mathrm{vac}}$ en los conjuntos de datos actuales para no perturbar fits globales. Ello fija $\kappa, c_V/\Lambda, y_\nu/\Lambda$ a rangos subcríticos.

5. Corriente de sincronización y densidad de fase

Definimos la **corriente de fase coherencial** $J^\mu_\Sigma := \partial^\mu\Sigma$ y la **densidad de sincronización** $\rho_\Sigma := n_\nu\,\exp(\kappa\Sigma)$, que moldean *geodésicas* Σ para trayectorias de mínima disipación. Para haces neutrínicos, la ecuación de transporte de fase adquiere

$$\partial_\mu(\rho_\Sigma\,v^\mu) = -\Gamma_\phi[\Sigma,\chi]\,\rho_\Sigma, \tag{8}$$

donde Γ_ϕ parametra pérdidas por fricción (medio/granularidad). En el límite de fricción marginal, $\Gamma_\phi \to 0^+$, los neutrinos se comportan como *testigos de coherencia*, conservando fase causal.

6. Cotas de positividad, causalidad y estabilidad

Para preservar causalidad/unidad al nivel EFT:

- La parte dispersiva de amplitudes 2→2 con intercambio σ debe satisfacer relaciones de dispersión hacia adelante $\Rightarrow$ *cotas de positividad* sobre combinaciones de $\{\lambda, g, \kappa, c_V/\Lambda, y_\nu/\Lambda\}$.
- El acoplo derivativo c_V/Λ no debe inducir superluminalidad efectiva: en el ansatz (3), exigir $|\kappa\Sigma| \ll 1$ en trayectos relevantes y $|c_V \partial\Sigma|/\Lambda \ll E$.
- Estabilidad del vacío: $\lambda > 0$, $m_\sigma^2 = 2\mu^2 > 0$, ausencia de fantasmas.

7. Observables y ruta de falsación

7.1. Long–baseline (T2K, NOvA, DUNE, Hyper-K)

Buscar **modulaciones lentas** de $P_{\alpha\to\beta}(L, E)$ correlacionadas con un $\mathcal{S}[\Sigma]$ geofísico/astronómico:

$$\mathcal{S}[\Sigma] \equiv a_0 + a_1\langle\partial_0\Sigma\rangle + a_2\langle\nabla\Sigma\rangle\cdot\hat{\ell} + a_3\langle\delta\Sigma\rangle,$$

donde $\hat{\ell}$ es la dirección del haz. Ajustar ε_Σ de (7) e imponer $|\varepsilon_\Sigma| < \varepsilon_{\max}$ (cota experimental).

7.2. Relojes y cavidades

Si $g_{\mu\nu}^{(\Sigma)}$ es conforme, modos de resonancia acumulan un *redshift* Σ: $\delta f/f \simeq \kappa\,\delta\Sigma$. Correlacionar $\delta f/f$ de relojes ópticos con Φ_Σ extraída en campañas coincidentes de neutrinos $\Rightarrow$ test cruzado.

7.3. FET / SYNCTRON (-metrics)

En el banco , el *locking* (KPIs: LI$\geq 0{,}9$, $R > 0{,}95$, RMSE$_{SL} < 0{,}1$, reproducibilidad $\geq 95\,\%$) fija κ_Σ y rangos de $\delta\Sigma$ realizables. Estas escalas deben ser consistentes con las magnitudes de ε_Σ permitidas por neutrinos/relojes; de lo contrario, el mecanismo propuesto se falsaría por *inconsistencia de escala*.

Matriz de decisión (binaria)

- **Confirma (C):** Se observa $\Delta\Phi_\Sigma \neq 0$ con misma señal en (i) long–baseline y (ii) relojes/cavidades, consistente con $\kappa, c_V/\Lambda, y_\nu/\Lambda$ y con KPIs FET.
- **Falsa (F):** $\Delta\Phi_\Sigma = 0$ dentro de sensibilidad mejorada mientras FET exige κ grande para sus propias firmas (inconsistencia de escala).
- **Indecidible (I):** Señales subcríticas en ambos; aumentar sensibilidad o reducir sistemáticos.

8. Estimación de órdenes de magnitud

Para $L = 1300\,\text{km}$, $E = 2{,}5\,\text{GeV}$ (DUNE) y $\Delta m^2 \simeq 2{,}5\times10^{-3}\,\text{eV}^2$:

$$\Delta\Phi_{\text{vac}} \sim \mathcal{O}(1).$$

Exigir $|\Delta\Phi_\Sigma| \lesssim 0{,}1$ implica $|\varepsilon_\Sigma| \lesssim 0{,}1 \Rightarrow |\kappa\,\delta\Sigma| + |\delta V_\Sigma/\Delta m^2| \lesssim 10^{-1}$. Si $|\delta\Sigma| \sim 10^{-6}$ (cota de relojes), entonces $|\kappa| \lesssim 10^5$ es trivial; pero la *consistencia de escala FET* suele forzar $|\kappa\delta\Sigma| \ll 10^{-3}$. Por tanto, la ventana operativa natural es $|\varepsilon_\Sigma| \sim 10^{-3}$–$10^{-2}$, medible con campañas combinadas.

9. Protocolo estadístico y -metrics unificadas

- **Pre-registro** de hipótesis y ε_Σ esperada.
- **Modelo jerárquico bayesiano** para $P_{\alpha\to\beta}$ con hiperparámetro ε_Σ y covariables $\mathcal{S}[\Sigma]$.
- **Decisión**: $|\varepsilon_\Sigma| > 0$ con $\geq 3\sigma$ y consistencia entre experimentos independientes.
- **-KPIs en banco**: LI, $R(t)$, RMSE_{SL}, κ_Σ documentados como *contrato de escala* con los ε_Σ ajustados.

10. Autocrítica (cómo validamos y dónde puede fallar)

Aciertos de diseño. (i) El acoplo derivativo suprimido es el *más conservador* para no violentar fits de oscilaciones; (ii) el ansatz conforme mínimo (3) cierra variacionalmente y es trazable; (iii) la ruta de falsación *exige convergencia* entre dominios (neutrinos, relojes, FET), evitando lecturas ad hoc.

Riesgos y supuestos. (a) *Identificabilidad*: ε_Σ puede mimetizar sistemáticos de energía/baseline; mitigamos con covariables $\mathcal{S}[\Sigma]$ y campañas simultáneas. (b) *No–adiabaticidad*: si Σ varía rápido localmente, emergen efectos tipo LZ difíciles de separar; esto se vuelve un *test*, no un defecto, si se correlaciona con relojes. (c) *Ventanas nulas*: Si κ y c_V/Λ son aún más pequeños, el mecanismo se vuelve irrelevante experimentalmente; en ese caso, la lectura TCDS sobre neutrinos como corriente de fase *persiste ontológicamente* pero *carece de palanca observacional* presente. (d) *Compatibilidad EFT*: Las cotas de positividad pueden apretar regiones del espacio de parámetros; si el polígono permitido queda vacío frente a datos, la propuesta *se descarta* sin ambigüedad.

Cómo llegamos a estar razonablemente seguros del encuadre. 1) Partimos del lagrangiano (Σ, χ) con ruptura espontánea (corpus TCDS) y dedujimos el ansatz conforme mínimo que respeta $R \propto \nabla^2\Sigma$. 2) Elegimos un acoplo derivativo al sector neutrínico que *no* altera masas a árbol y deja los fits actuales casi intactos. 3) Propagamos la fase en geodésicas Σ y mostramos su traducción directa a $\Delta\Phi_\Sigma$ tipo MSW generalizado, lo que hace *auditable* la hipótesis con datos existentes. 4) Encadenamos ε_Σ a κ_Σ y KPIs FET (contrato de escala), cerrando el *bucle causal* entre teoría, banco y neutrinos. 5) Situamos cotas de positividad/causalidad para impedir interpretaciones que violen axiomas fundamentales. En conjunto, esto otorga *coherencia interna, trazabilidad y salida binaria*: si no aparece $\Delta\Phi_\Sigma$ en el rango compatible con FET/relojes, la lectura TCDS $\to$ *falsada en su forma acoplada.*

11. Conclusión

Hemos mostrado que la lectura TCDS de los neutrinos como *existencia casi pura* —corriente de fase causal mínima— admite una formalización EFT conservadora, compatible con la fenomenología SM, que predice *correcciones de fase* calculables y falsables. La misma arquitectura Q–Σ–ϕ–χ que gobierna FET y relojes dicta el *contrato de escala* de ε_Σ. Esta simetría metodológica es la fuerza de la propuesta: o converge en datos cruzados, o se descarta sin ambages.

Trabajo inmediato. (i) Ajuste bayesiano de ε_Σ con datasets públicos (NOvA/T2K) usando covariables $\mathcal{S}[\Sigma]$; (ii) campaña piloto reloj–cavidad sincronizada con haz; (iii) reporte FET con KPIs y traducción a κ efectiva para cerrar el triángulo de validación.