Modelo TCDS de Tres Fuerzas, Versión Hamiltoniana Parsimoniosa 2.0: Simetrías, PPN/WEP, Amplitudes Electrodébiles, Simulación ΣFET y Protocolos Experimentales

Genaro Carrasco Ozuna

(Dated: October 6, 2025)

Abstract

Se responde a las críticas incorporando: (i) motivación desde simetrías y EFT, (ii) derivaciones explícitas de PPN y WEP para un acoplo conforme mínimo, (iii) correcciones electrodébiles vía portal escalar con fórmulas de amplitudes/anchos, (iv) mapeo matemático entre parámetros $(m_\sigma, \alpha, g_{\rm eff})$ y métricas Σ-FET $(\mathrm{LI}, R, \mathrm{RMSE}_{SL})$, y (v) hardware y protocolos reproducibles. El marco mantiene invarianza de Lorentz, conserva la correspondencia con GR/QFT en sus dominios, y define ventanas falsables unificadas.

I. PRINCIPIO DE ACCIÓN, SIMETRÍAS Y PARSIMONIA

Postulado. Un campo de coherencia real Σ con simetría discreta $\Sigma \to -\Sigma$ (Z_2) y ruptura espontánea genera el cuanto σ que unifica la cara geométrica (gravo) y la de identidad (débil). La teoría efectiva es local, renormalizable a orden bajo y Lorentz-invariante.

A. Acción efectiva Σ–χ con $\mathbf{Z}_2$ y portal de Higgs

$$S = \int d^4x \left[\tfrac{1}{2}(\partial\Sigma)^2 + \tfrac{1}{2}(\partial\chi)^2 - \Big(-\tfrac{1}{2}\mu^2\Sigma^2 + \tfrac{1}{4}\lambda\Sigma^4 + \tfrac{1}{2}m_\chi^2\chi^2 + \tfrac{1}{2}g\,\Sigma^2\chi^2\Big)\right], \tag{1}$$

con ruptura $\Sigma = \Sigma_0 + \sigma$, $\Sigma_0 = \mu/\sqrt{\lambda}$, $m_\sigma = \sqrt{2}\mu$. El acoplo al SM se restringe por parsimonia a un *portal escalar*:

$$\Delta\mathcal{L}_{\rm portal} = -\kappa\,|H|^2\Sigma^2, \tag{2}$$

que preserva gauge y Lorentz. No se introducen términos con índices libres no contraídos.

B. EOM y Hamiltoniano

Euler–Lagrange produce

$$\Box\Sigma - \mu^2\Sigma + \lambda\Sigma^3 + g\,\Sigma\,\chi^2 = 0, \qquad \Box\chi + (m_\chi^2 + g\Sigma^2)\chi = 0. \tag{3}$$

El Hamiltoniano densidad es $\mathcal{H} = \frac{1}{2}\pi_\Sigma^2 + \frac{1}{2}(\nabla\Sigma)^2 + \frac{1}{2}\pi_\chi^2 + \frac{1}{2}(\nabla\chi)^2 + V(\Sigma,\chi)$, positivo definido para $\lambda > 0$.

II. SECTOR GEOMÉTRICO: ANSATZ CONFORME Y DERIVACIONES PPN/WEP

A. Acoplo conforme mínimo y marcos

Se toma una métrica efectiva conforme (*Jordan*):

$$g_{\mu\nu}^{(\Sigma)} = A^2(\Sigma)\,\eta_{\mu\nu}, \qquad A(\Sigma) = \exp\left[\alpha_c\,\frac{\Sigma-\Sigma_0}{M_{\rm Pl}} + \tfrac{1}{2}\beta_c\left(\frac{\Sigma-\Sigma_0}{M_{\rm Pl}}\right)^2 + \cdots\right]. \tag{4}$$

Definiendo el campo adimensional $\varphi \equiv (\Sigma - \Sigma_0)/M_{\rm Pl}$, se tiene $\alpha_0 \equiv \frac{\mathrm{d}\ln A}{\mathrm{d}\varphi}\Big|_0 = \alpha_c$ y $\beta_0 \equiv \frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}\varphi}\Big|_0 = \beta_c$.

B. PPN: γ, β

Para un escalar ligero con acoplo conforme $\{A(\Sigma)\}$ los parámetros PPN clásicos toman forma[1]:

$$\gamma - 1 = -\frac{2\alpha_0^2}{1+\alpha_0^2} \simeq -2\alpha_0^2 + \mathcal{O}(\alpha_0^4), \tag{5}$$

$$\beta - 1 = \frac{\frac{1}{2}\beta_0\,\alpha_0^2}{(1+\alpha_0^2)^2} \simeq \tfrac{1}{2}\beta_0\,\alpha_0^2 + \mathcal{O}(\alpha_0^4). \tag{6}$$

Condición de correspondencia: $|\gamma-1|, |\beta-1| \lesssim 10^{-5} \Rightarrow |\alpha_0| \ll 10^{-2.5}$ y $|\beta_0|$ acotado en consecuencia.

C. Velocidad de ondas gravitacionales

El acoplo puramente conforme no altera el cono de luz tensorial en el límite casi-Minkowski, por lo que $c_{\rm GW} = c$. Cualquier término derivativo no conforme debe anularse a nivel de sensibilidad actual.

[1] Expansión estándar en marcos conformes; aquí se reexpresa en términos de α_0, β_0.

D. Fuerza Yukawa y WEP

Las fluctuaciones σ generan una corrección Yukawa al potencial newtoniano:

$$V(r) = -\frac{Gm_1m_2}{r}\left[1 + \alpha\, e^{-r/\lambda}\right], \qquad \lambda = \frac{\hbar}{m_\sigma c}. \tag{7}$$

La *carga escalar* efectiva de una especie i es $\alpha_i = \partial_\sigma \ln m_i|_0$, de modo que $\alpha = \alpha_1\,\alpha_2$. La violación de la Equivalencia Débil se cuantifica por el parámetro de Eötvös η_{AB}:

$$\eta_{AB} \simeq (\alpha_A - \alpha_B)\,\alpha_E, \tag{8}$$

que exige $|\eta_{AB}| \lesssim 10^{-15}$ en mezclas materiales. En el marco conforme (4), $\alpha_i \simeq \alpha_0\,Q_i$ con Q_i una carga de composición; esto obliga $|\alpha_0|$ y las diferencias $Q_A - Q_B$ a valores suprimidos o a blindaje ambiental.

III. CARA ELECTRODÉBIL: MEZCLA ESCALAR Y AMPLITUDES

A. Mezcla Higgs–σ

Con (2) y $H = (0, (v+h)/\sqrt{2})^T$ surgen términos $\sim \kappa v h \Sigma^2$. Diagonalizando el subespacio (h, σ) se obtiene un ángulo de mezcla:

$$\sin\theta \simeq \frac{\kappa\, v\, \Sigma_0}{m_h^2 - m_\sigma^2} \quad \text{para} \quad |\sin\theta| \ll 1. \tag{9}$$

Las acoplanzas del Higgs físico a fermiones y gauge se escalan por $\cos\theta$. La señal global μ cumple aproximadamente

$$\mu \simeq \frac{\cos^2\theta\,\Gamma_{\rm SM}}{\cos^2\theta\,\Gamma_{\rm SM} + \Gamma_{\rm new}}, \tag{10}$$

donde $\Gamma_{\rm new}$ incluye $h \to \sigma\sigma$ si está abierto.

B. Ancho parcial $h \to \sigma\sigma$

Del portal se induce un vértice $h\sigma\sigma$ efectivo $\lambda_{h\sigma\sigma} \simeq \kappa v \cos\theta$ (régimen de pequeña mezcla). Entonces

$$\Gamma(h \to \sigma\sigma) = \frac{\lambda_{h\sigma\sigma}^2}{32\pi m_h}\sqrt{1 - \frac{4m_\sigma^2}{m_h^2}}. \tag{11}$$

Condición de correspondencia EW: exigir $\sin^2\theta$ y $\Gamma(h \to \sigma\sigma)$ bajo los límites de precisión actuales, preservando la estructura V–A y los anchos de W/Z a árbol.

IV. SIMULACIÓN MESOSCÓPICA Y MAPEO A Σ-METRICS

A. Ecuación de fase tipo Adler para locking

Bajo inyección periódica en una celda activa, el modo dominante se describe por

$$\dot{\phi} = \Delta\omega - K \sin\phi + \xi(t), \tag{12}$$

con $\Delta\omega = 2\pi(f_{\text{in}} - f_0)$, ξ ruido efectivo y

$$K = \Gamma(m_\sigma, g_{\text{eff}}, D, \beta)\, A_c, \tag{13}$$

donde Γ es una ganancia de coherencia que crece con acoplo efectivo g_{eff} y decrece si m_σ sale de banda sensible. El *locking* ocurre si $|\Delta\omega| \leq K$. De aquí se obtienen predicciones:

$$\Delta f_{\text{lock}} \equiv 2K/2\pi \propto A_c\, \Gamma(m_\sigma, g_{\text{eff}}, \ldots), \qquad \text{LI} \simeq 1 - \frac{\text{Var}(\phi)}{\pi^2}, \tag{14}$$

y la calidad del ajuste sinusoidal fija RMSE_{SL}.

B. Reglas de decisión (Σ-Metrics)

$$\text{LI} \geq 0.90, \quad R > 0.95, \quad \text{RMSE}_{SL} < 0.10, \quad \text{reproducibilidad} \geq 95\%.$$

La **co-tensión gravo–débil** se materializa cuando el mismo $(m_\sigma, g_{\text{eff}})$ que respeta Yukawa/WEP reproduce $\Delta f_{\text{lock}}(A_c)$ y eleva LI.

V. HARDWARE Y PROTOCOLOS EXPERIMENTALES

A. Banco A: Fuerzas sub-mm tipo Yukawa

Objetivo: acotar (α, λ) para $\lambda \in [10^{-5}, 10^{-1}]$ m.

- Geometría masa–masa modulada, actuador piezo, sensor torsional MEMS con resoluciones sub-fN$\sqrt{\text{Hz}}$.
- Calibración estática con $1/r^2$, referencia térmica y control nulo rotado 90°.
- Secuencia: barrer distancia, demodular a la frecuencia de excitación, ajustar a $V(r)$ con términos sistemáticos.

TABLE I. Resumen de *targets* y decisiones

Banco	Observable	Meta	Criterio de decisión
A (Yukawa)	(α, λ)	α por debajo de curvas sub-mm	Consistencia con ΣFET
B (ΣFET)	$\Delta f_{\mathrm{lock}}, \mathrm{LI}, R, \mathrm{RMSE}_{SL}$	KPIs umbral	Co-tensión con Banco A
C (Óptica)	$\Delta\theta(\mathbf{r})$	señal $> 5\sigma$	Perfil compatible con $\nabla\Sigma$
D (WEP)	η_{AB}	$\lvert\eta_{AB}\rvert < 10^{-15}$	Compatibilidad con A–C

B. Banco B: ΣFET / SYNCTRON

Objetivo: mapas de Arnold y KPIs.

- Núcleo oscilador controlado, inyección f_{in}, A_c, lectura de fase y espectro.
- Barridos 2D (f_{in}, A_c), cómputo de $\mathrm{LI}, R, \mathrm{RMSE}_{SL}$, y Δf_{lock}.
- Manifiesto de corrida: versión firmware, SNR, controles nulos off-axis, sellado hash.

C. Banco C: Óptica de coherencia

Objetivo: microdeflexión $\Delta\theta \propto \partial_i \ln A(\Sigma)$.

- Interferómetro de frente de onda, celda activa, modulación de $\nabla\Sigma$.
- Demodulación síncrona y mapa espacial de $\partial_i \ln A$.

D. Banco D: WEP diferencial

Objetivo: $|\eta_{AB}| \lesssim 10^{-15}$.

- Péndulo de composición dual, reversión rápida, control de gradientes.
- Análisis bayesiano con ciegas para η_{AB}.

VI. RESULTADOS ESPERADOS, REFUTACIÓN Y TRAZABILIDAD

Validación si existe un conjunto $(m_\sigma, \alpha, \alpha_0, \beta_0, \kappa)$ que:

1. Satisface PPN/WEP: $|\gamma - 1|, |\beta - 1| \lesssim 10^{-5}$, $|\eta_{AB}| \lesssim 10^{-15}$.
2. Ubica (α, λ) bajo límites sub-mm y reproduce $\Delta f_{\rm lock}(A_c)$.
3. Respeta precisión EW: $|\sin\theta|$ pequeño y $\Gamma(h \to \sigma\sigma)$ dentro de cotas.

Refutación si cualquiera falla a sensibilidad declarada.

VII. AUTOCRÍTICA Y VALIDACIÓN DE LA CONCLUSIÓN

Vacíos cerrados. Se añade motivación por Z_2 y EFT, PPN/WEP explícitos y fórmulas EW. Se define Γ como puente teórico–mesoscópico y se proveen bancos concretos.
Limitaciones. $\Gamma(m_\sigma, g_{\rm eff}, D, \beta)$ requiere calibración *in situ*. La linealización PPN supone campo ligero y régimen cuasiestático.
Cómo se verificó internamente. Cadena: (i) Hamiltoniano estable y $\mathrm{Z}_2 \Rightarrow \sigma$ bien definido; (ii) $A(\Sigma)$ conforme $\Rightarrow$ fórmulas PPN/WEP; (iii) portal Higgs $\Rightarrow \sin\theta,\ \Gamma(h \to \sigma\sigma)$; (iv) Adler $\Rightarrow \Delta f_{\rm lock}, \mathrm{LI}, R, \mathrm{RMSE}_{SL}$; (v) coherencia cruzada por co-tensión A–D.
Parsimonia. Un solo escalar, un portal y un acoplo conforme mínimo cubren los cuatro frentes empíricos con parámetros contables.

Appendix A: Derivación PPN detallada

Expandiendo $A(\Sigma)$ hasta segundo orden: $A = 1 + \alpha_0\varphi + \frac{1}{2}(\alpha_0^2 + \beta_0)\varphi^2 + \cdots$. En el régimen cuasiestático el potencial efectivo es $U = G\int \rho(\mathbf{r}')\, \frac{d^3r'}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}\, [1 + \alpha e^{-|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|/\lambda}]$, y las perturbaciones métricas en gauge estándar rinden los coeficientes mostrados en el texto para γ, β.

Appendix B: Amplitudes electrodébiles

La matriz de masas escalar en base (h, σ) es $\mathcal{M}^2 = \begin{pmatrix} m_h^2 & \kappa v \Sigma_0 \\ \kappa v \Sigma_0 & m_\sigma^2 \end{pmatrix}$. La rotación ortogonal define θ como en el texto. Las amplitudes $h \to f\bar{f},\ VV$ se escalan por $\cos\theta$. El canal $h \to \sigma\sigma$ añade ancho nuevo con la expresión dada.

Appendix C: Simulación reproducible de locking

Modelo numérico: integrar $\dot{\phi} = \Delta\omega - K \sin\phi + \xi(t)$ con ξ gaussiano blanco, $K = \Gamma A_c$.
KPIs: $\mathrm{LI} = 1 - \mathrm{Var}(\phi)/\pi^2$; R y RMSE_{SL} del ajuste $x(t) = X_0 + X_1 \sin(2\pi f_{\mathrm{in}} t + \phi)$.
Pseudocódigo:

1. Barrer f_{in} y A_c; fijar $m_\sigma, g_{\mathrm{eff}} \Rightarrow \Gamma$.
2. Integrar $\phi(t)$; descartar transitorios; calcular KPIs.
3. Ajustar Γ con datos para extraer $(m_\sigma, g_{\mathrm{eff}})$ bajo priors PPN/WEP/EW.

Appendix D: BOM mínima y metrología

- **Banco A**: MEMS torsional (<100 aN/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$), piezo xyz, masas patrón, cámara térmica ± 1 mK.
- **Banco B**: VCO (10 MHz–100 MHz), generador/analizador, PLL de lectura de fase, FPGA, cámara EMI.
- **Banco C**: Interferómetro Shack–Hartmann, celda activa, actuadores de gradiente.
- **Banco D**: Péndulo Eötvös dual, giradiscos de reversión, magnetometría de entorno.

[1] TCDS Core Notes: Acción, Z_2, portal y Σ-metrics.

[2] TCDS PPN/WEP Notes: acoplo conforme y derivaciones.

[3] TCDS ΣFET Protocols: mapas de Arnold, KPIs y manifiestos.