Plan de Refuerzo TMRCU — Plenitud Predictiva Cuantitativa

Documento operativo para cerrar parámetros, simular firmas experimentales y consolidar un Technical Design Report (TDR).

Este plan traduce la base ontológica (5 Decretos), el formalismo (Lagrangiano Σ–χ) y las aplicaciones (SAC, Σ-Computing, ΣFET) en predicciones cuantitativas y protocolos ejecutables. Contiene tres frentes: (1) fijación de parámetros libres con límites externos, (2) simulaciones numéricas de alta fidelidad para el ΣFET/SYNCTRON, y (3) consolidación de un Technical Design Report (TDR) llave en mano.

1) Fijar los Parámetros Libres del Modelo

Objetivo: acotar (μ, λ, g, m_χ, …) usando límites robustos de cosmología, colisionadores y gravedad débil, para reducir el espacio de búsqueda experimental.

Observable / Límite	Cota numérica (referencial)	Mapeo TMRCU	Efecto en parámetros
Densidad de materia oscura (Ω_c h²)	≈ 0.120 ± 0.001	ρ_MEI = ρ_DM (promedio cosmológico)	Fija densidad de fondo de χ; restringe
H→ invisible (LHC, combinación Run-2)	BR(H→inv) ■ 10–20% (95% CL)	Acoplos portal Σ–SM / mezcla efectiva	Acota mezcla Σ↔H y acoplo efectivo
Principio de Equivalencia (MICROSCOPE)	η ■ 10■¹■	Fuerzas escalares de alcance macroscópico	Limita acoplos escalares no universal
Ley del inverso del cuadrado (sub-mm)	Sin desviaciones a ~50–100 μm	Interacciones Yukawa/Σ-χ	Excluye (α, λ) grandes a micro-escala
Casimir / No-Newtonianas (nano-μm)	Fuertes límites adicionales	Portal Σ con modos de vacío	Restringe nuevas fuerzas cortas acop

Procedimiento práctico:

1 Definir el vector de parámetros θ = (μ, λ, g, m_χ, λ_χ, …) y sus dominios físicos (positividad, estabilidad).

2 Construir una función de verosimilitud L(θ) como producto de contribuciones: L = L_cosmo × L_LHC × L_WEP × L_ISL × L_Casimir.

3 Usar muestreo Bayesiano (MCMC) para obtener la región de alta probabilidad posterior; salida: caja de tasas/masas y mezclas permitidas.

4 Entregar un ‘Mapa de Calor’ con m_σ frente a g_ΣSM y bandas excluidas por cada familia de límites.

2) Simulaciones Numéricas de Alta Fidelidad (ΣFET/SYNCTRON)

Objetivo: predecir firmas cuantitativas (línea, fase, potencia, RIN, Allan) bajo una inyección débil coherente que modela el acoplo al Sincronón.

- Modelo base: oscilador no lineal con ruido (Adler/Kuramoto estocástico).
- No linealidades realistas (curvas I–V, saturación de ganancia) y ruido térmico/1/f.
- Inyección Σ: término de forzamiento f_σ(t) con amplitud ε(g, m_σ) y fase relativa; barrido en frecuencia.
- Observables: ancho de línea Δf, salto de fase Δϕ, ganancia diferencial dG/df, espectro de ruido de fase S_ϕ(f), Allan deviation σ_y(τ).
- Criterio de detección predefinido: ≥5σ en Δ(Δf) o en una combinación lineal de métricas, con control de artefactos.

Esquema de simulación (pseudo-código):

```
for freq in sweep( f_min, f_max, step ):
# Oscilador estocástico (Adler) con ruido y no linealidad
dtheta = (Δω - K*sin(theta) + ξ(t)) dt
# Forzamiento Σ (hipótesis Sincronón)
dtheta += ε(g, m_σ) * sin(2π*freq*t + ϕ■) dt
# Integración (Euler–Maruyama), registro de señal y estimador espectral
record(phase, amplitude)
fit_linewidth, phase_step, Sϕ = analyze(record)
metrics.append([freq, fit_linewidth, phase_step, Sϕ])
postprocess(metrics) → firma esperada (picos, estrechamientos, offsets)
```

Salida que debe entregar la simulación:

- Curvas ‘freq vs Δf’ con barras de incertidumbre y banda de decisión 5σ.
- Mapa 2D (ε, freq) con región de bloqueo y contornos de SNR.
- Tabla de especificación objetivo (ejemplo): ‘estrechamiento Δf = 3.2 kHz ± 0.4 kHz @ 4.6 GHz, Pinj = –80 dBm, T = 300 K, BW = 1 kHz’.

3) Technical Design Report (TDR) — Versión Llave en Mano

Objetivo: documento ejecutable por cualquier laboratorio, con diseño, análisis y sensibilidad cerrados.

Sección	Contenido mínimo
Arquitectura del experimento	Esquema del montaje ΣFET/SYNCTRON; cavidad/‘Σ-gate’; rutas de señal; blindajes y con
Lista de materiales (BOM)	VNA 6–8 GHz, osciloscopios RF, LNA bajo-ruido, generadores coherentes, lock-in, refere
Calibración y controles	Electrostático ciego, gemelo sin cavidad, inversión de fase, ‘dummy loads’, barridos fuera
Plan de adquisición y análisis	Código (Python) para espectros, Δf, $S\phi(f)$, Allan; preregistro; versiónado; criterios de exclu
Análisis de sensibilidad	Modelo de ruido completo, presupuesto de errores, simulación Monte Carlo, potencia mín
Resultados esperados	Firmas cuantitativas con bandas $1\sigma/2\sigma$, región de interés en frecuencia, tiempos de integr
Gestión de datos	Estructura de carpetas, metadatos, hashes, trazabilidad, publicación OSF/Zenodo.

Checklist de salida (éxito del refuerzo):

- Región de interés (m_σ, g) acotada por combinación de límites externos.
- Simulaciones con firmas cuantitativas y SNR ≥ 5 en ventanas de frecuencia definidas.
- TDR con BOM y protocolos, más scripts de análisis listos para reproducibilidad.

Autocrítica y Validación

• Trazabilidad: este plan mapea explícitamente observables establecidos (cosmología, LHC, gravedad débil) a parámetros del Lagrangiano Σ–χ. • Cautelas: no se fijan números finales sin correr el ajuste Bayesiano; los valores en tablas son cotas de referencia. • Riesgos: (i) mezclas Σ–H pueden depender de supuestos UV; (ii) límites sub-mm y Casimir exigen modelado cuidadoso de cargas de parche; (iii) la 'señal Σ' en ΣFET podría confundirse con artefactos RF si no se aplican controles ciegos. • Cómo se valida: (1) combinación consistente de límites; (2) simulaciones que predicen métricas específicas (Δf, $S\phi$, Allan) con umbrales 5σ; (3) TDR que obliga preregistro y controles.

Anexos técnicos TMRCU — EFT, mapa grav./PPN y límites experimentales
Fecha: 2025-08-25

Estos anexos entregan (i) un **Lagrangiano EFT** para el campo de coherencia canonizado `σ` (con supresión explícita por `1/Λ`), (ii) un **esquema Σ→g_{μν}** con fórmulas PPN listadas para traducir tu acoplamiento a límites solares, y (iii) una **tabla mínima de límites experimentales** con su mapeo al modelo (incluye números guía). Señalo siempre **qué vía** sigo para cada ecuación.

I. Lagrangiano EFT corregido (consistente con `1/Λ`)

Vía usada: partimos de un escalar real `σ` con dimensión de masa 1 en 4D y cinética canónica. Todo operador de **dimensión 5** se **suprime por Λ**. Si prefieres trabajar con el orden de coherencia adimensional `Σ`, definimos `σ = f_Σ Σ` y reemplazamos `σ/Λ → (f_Σ/Λ) Σ`.

$$
\mathcal{L}_\text{TMRCU-EFT} = \mathcal{L}_\text{SM} + \frac{1}{2} (\partial_\mu \sigma)(\partial^\mu \sigma) - V(\sigma)
\;+\;
\frac{\kappa_H}{\Lambda}\,\sigma\, H^\dagger H +
\frac{\lambda_{H\sigma}}{2\Lambda^2}\,\sigma^2 H^\dagger H
\;+\;
\sum_{V\in\{B,W,G\}} \frac{c_V}{4\Lambda}\,\sigma\, F^{(V)}_{\mu\nu} F^{(V)\,\mu\nu}
\;+\;
\sum_f \frac{y_f}{\Lambda}\,\sigma\, \bar Q_L H f_R + \text{h.c.}
\;+\;
\frac{c_J}{\Lambda}\,(\partial_\mu \sigma) J^\mu \;.
$$

- **Potencial**: $V(\sigma)=\tfrac{1}{2} m_\sigma^2\sigma^2 + \tfrac{\lambda_3}{3!}\sigma^3 + \tfrac{\lambda_4}{4!}\sigma^4$.
- **Términos gauge**: $F^{(B)}_{\mu\nu}$, $F^{(W)}_{\mu\nu}$, $F^{(G)}_{\mu\nu}$ son los tensores de U(1)_Y, SU(2)_L, SU(3)_c. Tras renormalizar cinética (estilo **dilatón**), emergen vértices $\sigma\to VV$ y variación efectiva de acoplos.
- **Portal Yukawa gauge–invariante**: $\sigma\,\bar Q_L H f_R/\Lambda\Rightarrow\sigma \bar f f$ tras EWSB, sin romper simetrías.
- **Corriente derivativa** $(\partial\sigma)\cdot J /\Lambda$: integrar por partes liga a **divergencias de corrientes** (proporcionales a masas/anomalías).

> **Elección práctica:** si tu objetivo inmediato es **minimizar** violaciones de equivalencia/PPN, toma **acoplo universal** vía gravitación (sección II) y **apaga** c_J y los acoplos no universales a fermiones. Mantén κ_H, c_V pequeños y compatibles con Higgs y relojes atómicos.

II. Esquema $\Sigma \to g_{\mu\nu}$ y fórmulas PPN (gravedad emergente con EFT)

Vía usada: nos basamos en el formalismo estándar de **escalar–tensor** (Damour–Esposito-Farèse). Trabajamos en **marco de Einstein** con métrica $g_{\mu\nu}$ y acoplo **conforme** de la materia:

$$
S = \int d^4x\,\sqrt{-g}\left[\frac{M_\text{Pl}^2}{2} R - \frac{1}{2}(\partial\sigma)^2 - V(\sigma) \right]
+ S_\text{m}[\psi_i, A^2(\sigma)\, g_{\mu\nu}] \;.
$$

- **Mapa TMRCU:** identifico tu **Σ** operativa como $\Sigma = \sigma/f_\Sigma$. La **métrica física** vista por la materia es $\tilde g_{\mu\nu} = A^2(\sigma) g_{\mu\nu}$. (Un término **disformal** $+ B(\sigma)\,\partial_\mu\sigma\,\partial_\nu\sigma/\Lambda^2$ **se puede añadir**, pero lo fijo a cero en el Sistema Solar para evitar dependencias en gradientes cosmológicos.)
- **Función de acoplo:** $\alpha(\sigma) \equiv d\ln A(\sigma)/d\sigma$, y sus valores de fondo $\alpha_0 = \alpha(\sigma_0),\; \beta_0 = d\alpha/d\sigma|_{\sigma=\sigma_0}$.

PPN en términos de (α_0,β_0) (límite cuasi-estático, campo débil):

$$
\gamma - 1 \approx -\frac{2\alpha_0^2}{1+\alpha_0^2} \simeq -2\alpha_0^2,\qquad
\beta - 1 \approx \frac{1}{2}\,\frac{\beta_0\,\alpha_0^2}{(1+\alpha_0^2)^2} \simeq
\tfrac{1}{2}\beta_0\alpha_0^2\;.
$$

Traducción numérica con Cassini y LLR:

- Cassini (Shapiro): $|\gamma-1| \lesssim 2.3\times10^{-5}$ ⇒ $|\alpha_0| \lesssim \sqrt{|\gamma-1|/2} \approx 3.391e-03$.
- LLR/Nordtvedt: $|\beta-1| \sim 10^{-4}$ ⇒ $|\beta_0| \lesssim 2\,|\beta-1|/\alpha_0^2 \approx 19.1$ **si** α_0 satura Cassini (de lo contrario, el límite en β_0 es más débil).

Elección de $A(\sigma)$ útil: $A(\sigma)=\exp(\alpha_1 \sigma/M_\text{Pl})$ con $|\alpha_1|\lesssim 3\times10^{-3}$ cumple Cassini; $\beta_0 = d\alpha/d\sigma = \alpha_1/M_\text{Pl}$ queda automáticamente pequeño.

III. Tabla mínima de límites experimentales y su mapeo

Vía usada: compilo límites **estándar y recientes** (Cassini/LLR, LHC Higgs, MICROSCOPE, relojes atómicos) y los **traduzco** a los parámetros del EFT cuando procede. Detalles numéricos y fuentes se citan abajo.

> La versión interactiva de esta tabla está visible en esta sesión como “**Límites experimentales mínimos**”.

- **Cassini (Shapiro)**: \(|\gamma-1| \lesssim 2.3\times10^{-5}\) ⇒ \(|\alpha_0| \lesssim 3.391e-03\).
- **LLR/Nordtvedt**: \(\beta-1 \approx (1.2\pm1.1)\times10^{-4}\) ⇒ cota sobre \(\beta_0\) dada \(\alpha_0\).
- **Higgs (CMS Nature 2022; ATLAS Nature 2022)**: \(\mu\approx1\) a nivel \(\sim 6\%\) ⇒ para mezcla universal pura, \(|\sin\theta| \lesssim 0.33\) (depende de supuestos sobre anchos).
- **BR(H→inv.) comb.**: \(\,<10.7\%\) ⇒ restringe \(\Gamma_\text{new}\).
- **MICROSCOPE (WEP)**: \(\eta \sim 10^{-15}\) ⇒ favorece **universalidad** de acoplos a composición.
- **Relojes atómicos**: \(|\dot\alpha/\alpha| \lesssim 10^{-18}\,\text{a}^{-1}\) ⇒ limita **acoplos fotónicos** y/o \(\dot\sigma\) de fondo.

IV. Recomendaciones de parametrización para TMRCU

1. **Gravedad:** adopta marco Einstein con \(A(\sigma)=\exp(\alpha_1 \sigma/M_\text{Pl})\), fija \(|\alpha_1| \le 3\times10^{-3}\).
2. **Higgs-portal:** usa \(\kappa_H/\Lambda, \lambda_{H\sigma}/\Lambda^2\) pequeños para respetar \(\mu\) y BR\((H\to\text{inv})\).
3. **Gauge:** comienza con \(c_B,c_W,c_G\to0\) y activa de forma controlada (revisa \(\sigma\to\gamma\gamma, Z\gamma, gg\)).
4. **Derivativos a fermiones:** fija \(c_J\to0\) por ahora (evitar WEP/clock bounds), o hazlos **universales**.
5. **Disformalidad:** \(B(\sigma)\approx0\) en Solar; explóralo en cosmología o régimen fuerte.

V. Fuentes (principales) para los límites
- **Cassini / Shapiro / γ:** Bertotti et al., *Nature* 425, 374 (2003); ver también Ashby (2010). Resumen reciente: de Mora Losada et al. (2025).
- **β (LLR/Nordtvedt):** Williams et al. (2009); Biskupek et al. (2020, arXiv:2012.12032); reseñas LLR 2018–2025.
- **Higgs (μ, BR_inv):** CMS *Nature* 2022; ATLAS *Nature* 2022; CERN Courier 2023; PDG 2024.
- **WEP (MICROSCOPE):** Touboul et al., *Phys. Rev. Lett.* 129, 121102 (2022).
- **Relojes atómicos / \(\dot\alpha\):** *Science* 2022; *Phys. Rev. A* 2024 (resúmenes).

Nota final sobre “tiempo emergente” (consistencia RG)
Para ligar tu tesis de “congelamiento del tiempo” ($\Sigma\to1$) con la **invariancia local** del tiempo propio, introduce un **funcional de reloj** $d\tau = \mathcal{F}(\partial\Sigma,\nabla\Sigma,\chi)\,dt$ cuya forma de bajo campo recupere el tiempo propio geodésico en $\tilde g_{\mu\nu}$. Esto evita contradicciones con observadores en **caída libre** y preserva RG en el límite.

— Fin de anexos —