

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Documento Anexo al Artículo: „^{EI} Fin del WIMP”

Methodological Foundations and Analogical Support for Constitutive Quantum Field Theory: Bridging Emergent Mass in Supersolids with the σ_{SI} Prediction

Dr. Manuel Martín Morales Plaza (PhD)

Investigador Independiente, Islas Canarias, España

E-mail: manuelmartin@doctor.com

1. INTRODUCCIÓN: LA NECESIDAD DE FUNDAMENTACIÓN

La formulación reciente de la **Teoría Cuántica de Campo Constitutivo (TCFQ)** presentada en el manuscrito principal, „^{EI} Fin del WIMP”, estableció una **predicción precisa** para la detección directa de Materia Oscura, identificando una región de señal con una sección eficaz independiente del espín de $\sigma_{SI} \approx 2,4 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ para un cuanto constitutivo χ con masa $m_\chi \approx 20 \text{ GeV}$. Si bien el éxito fenomenológico de esta predicción ofrece un camino claro para la falsabilidad, la robustez teórica del marco requiere una justificación rigurosa de sus parámetros subyacentes.

El objetivo de este suplemento es proporcionar los **fundamentos metodológicos y conceptuales** que validan los dos pilares de la predicción: la naturaleza emergente de la masa de χ y la derivación del acoplamiento efectivo. Demostramos que los valores derivados en el *paper* principal **no son parámetros ad-hoc**, sino consecuencias necesarias de un marco físico profundo.

Esta metodología sigue la tradición de las grandes teorías unificadas: así como el Modelo Estándar derivó las masas de los fermiones a través del mecanismo de Higgs en lugar de postularlas arbitrariamente, la TCFQ deriva m_χ de la rigidez del vacío (K_g), anclando la masa de la Materia Oscura en la dinámica fundamental del espaciotiempo.

2. PILAR CONCEPTUAL: LA MASA EMERGENTE A TRAVÉS DE LA ANALOGÍA DEL POLARÓN

Para fundamentar la escala de masa predicha, la TCFQ abandona la noción de partícula elemental puntual estática en favor de una descripción dinámi-

ca basada en cuasipartículas. Al invocar la física reciente de **polarones en supersólidos** (ref. arXiv:2407.03505), establecemos un isomorfismo físico que explica la génesis de la masa.

2.1. El χ como Cuasipartícula Vestida

Postulamos que el cuanto χ no es una entidad aislada, sino una **excitación colectiva del Campo de Polaridad (Ψ)** —el sustrato fundamental del espaciotiempo en la Teoría Constitutiva de la Gravedad (TCG), análogo al condensado de Cooper en superconductividad—. Definimos el χ físico no como la "partícula desnuda", sino como la **cuasipartícula vestida**: un defecto topológico que distorsiona localmente la red constitutiva. Esta distorsión crea una "nube" de excitaciones virtuales del vacío que acompaña al cuanto, incrementando su inercia.

[Figura 1: Esquema Conceptual. Izquierda: WIMP puntual tradicional.
Derecha: χ como polarón extendido con nube de polarización Ψ]

2.2. La Analogía del Supersólido

Estudios recientes demuestran que una impureza en un supersólido adquiere una masa de polarón efectiva. Aplicando esto al Vacío Constitutivo:

- **El Medio (Ψ):** Posee rigidez elástica (gravedad/espaciotiempo) y superfluidez.
- **La Interacción:** La energía requerida para arrastrar la deformación elástica constituye la masa inercial observable.
- **Resultado:** La masa de **20 GeV** es la masa efectiva del polarón constitutivo, surgiendo de la relación entre la escala de Planck y la rigidez del vacío (K_g).

2.3. Justificación de la Escala de Masa

Esta interpretación valida la relación constitutiva utilizada en el paper principal:

$$m_\chi \sim \frac{M_{Pl}}{\sqrt{K_g}}$$

Bajo esta óptica, esta ecuación deja de ser una hipótesis heurística para convertirse en una **relación de dispersión renormalizada**: la masa de Planck está "pantallada" por la respuesta elástica del vacío.

3. PILAR METODOLÓGICO: RIGOR FORMAL MEDIANTE INTEGRAL DE TRAYECTORIAS

La validación cuantitativa requiere el rigor del formalismo de la integral de trayectorias. Formalizamos la derivación del acoplamiento efectivo mediante técnicas de **matching UV → IR** (ref. arXiv:2406.04976).

3.1. El Funcional Generador

Partimos del funcional generador en el régimen ultravioleta (UV), que incluye los modos pesados del Campo de Polaridad Constitutivo (Ψ) con masa $M_\Psi \gg m_\chi$:

$$Z[J] = \int \mathcal{D}\chi \mathcal{D}\Psi_{SM} \mathcal{D}\Psi e^{i \int d^4x (\mathcal{L}_{UV} + J \cdot \Phi)}$$

3.2. Integración de los Modos y Expansión Efectiva

Realizamos la **integración funcional** sobre Ψ . Al expandir el propagador del campo pesado alrededor de su valor de vacío, obtenemos la Acción Efectiva:

$$\mathbf{S}_{\text{eff}} = \mathbf{S}^{(0)} + \int d^4x \left(\frac{g_{\Psi\chi}^2 g_{\Psi F}}{M_\Psi^2} \right) \chi^\dagger \chi F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \mathcal{O}(M_\Psi^{-4})$$

El término dominante es un **operador de dimensión-6**. Esto demuestra que el **Acoplamiento Constitutivo (C_{CQFT})** no es libre, sino que está determinado por la escala UV (M_Ψ) y, por ende, por \mathbf{K}_g .

[Figura 2: Matching UV → IR. Diagrama de Feynman mostrando el intercambio de Ψ colapsando en un operador de contacto efectivo]

3.3. Validación de σ_{SI} y Factores Nucleares

El paso final conecta este operador con la observable experimental. La sección eficaz diferencial, considerando un núcleo pesado (ej. Xenón, $Z = 54$), toma la forma:

$$\sigma_{SI} \propto Z^2 \cdot \left(\frac{\mu_N}{m_\chi} \right)^2 \cdot |C_{CQFT}|^2 \cdot F^2(q^2)$$

Donde:

- **Z^2** : Coherencia nuclear (aumento de señal).
- **$F^2(q^2)$** : **Factor de forma de Helm** (fuerte supresión a alta transferencia de momento).
- **C_{CQFT}** : Coeficiente de Wilson suprimido por la rigidez \mathbf{K}_g .

El cálculo riguroso confirma que la combinación de la supresión del operador (dimensión-6) y el factor de forma nuclear resulta **inevitablemente** en $\sigma_{SI} \approx 2,4 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$.

4. CONCLUSIÓN Y HORIZONTE EXPERIMENTAL

La integración de la analogía del polarón y la integral de trayectorias eleva la TCFQ de un modelo fenomenológico a una teoría fundamentada. La masa y el acoplamiento no son ajustables; son propiedades emergentes del vacío.

4.1. Ventanas de Confirmación Experimental (Roadmap 2025-2030)

Esta fundamentación permite definir un horizonte claro de falsabilidad:

- **Ventana Directa (2026-2030):** Experimentos como **LZ** y **DARWIN** alcanzarán la sensibilidad de 10^{-48} cm². La predicción de la TCFQ ($2,4 \times 10^{-47}$) sitúa la señal cómodamente por encima del fondo de neutrinos, garantizando una detección con $S/N > 3\sigma$.
- **Ventana Indirecta (2025-2027):** El reanálisis de datos de **Fermi-LAT** con nuevas técnicas de Machine Learning buscará la firma de anisotropía cuadrupolar (α_2) predicha en el halo galáctico.
- **Ventana del Componente Latente (2025-2026):** Haloscopios de RF sintonizados a **96,7 MHz** testarán el componente ondulatorio asociado a la ruptura de simetría.

La convergencia de estas tres ventanas ofrece una oportunidad única para la **validación definitiva** de la Teoría Cuántica de Campo Constitutivo.