# ERV–TMRCU: Espectroscopía de Resonancia del Vacío y Fórmulas Operativas para $\rho_{\mathbf{vac}}$

Diseño experimental, modelo matemático e inversa paramétrica ($m_\chi$, g) desde la TMRCU

**Resumen ejecutivo.** Se propone reemplazar el espejo oscilante del Efecto Casimir Dinámico (ECD) por un *Modulador de Fricción Cuántica* (MFC): un metamaterial acoplado al campo de Sincronización Lógica ($\Sigma$) que, al ser excitado a frecuencia $\Omega$, induce una oscilación $\delta\chi(t)$ del campo de Materia Espacial Inerte ($\chi$) en una cavidad óptica. Se lee ópticamente con láser estabilizado. El desplazamiento de fase $\Delta\phi$ y la potencia de bandas laterales permiten extraer, de forma *operativa*, la escala de energía del vacío $m_\chi$ (rigidez del campo $\chi$) y el acoplamiento g, según la TMRCU.

## 1) Principio físico y Lagrangiano efectivo TMRCU

Usamos un Lagrangiano efectivo mínimo en campos (unidimensional para claridad):

$$\blacksquare = ½(\partial\Sigma)^2 + ½(\partial\chi)^2 - V(\Sigma,\chi),$$

$$V(\Sigma,\chi) = -½\,\mu^2\,\Sigma^2 + ¼\,\lambda\,\Sigma\blacksquare + ½\,m_\chi^2\,\chi^2 + g\,\Sigma^2\,\chi^2.$$

De aquí emergen las ecuaciones de movimiento (con amortiguamiento $\gamma$ y fuentes J):

$$\blacksquare\Sigma + \mu^2\Sigma - \lambda\,\Sigma^3 - 2\,g\,\Sigma\,\chi^2 = J_\Sigma(t),$$

$$\blacksquare\chi + m_\chi^2\,\chi - 2\,g\,\Sigma^2\,\chi + \gamma\,\chi\blacksquare = J_\chi(t).$$

Linealizamos alrededor del vacío $\Sigma(t)=\Sigma\blacksquare+ s(t)$, $\chi(t)=0+ \delta\chi(t)$. A primer orden queda una ecuación de oscilador forzado para $\chi$:

$$\delta\chi\blacksquare + \gamma\,\delta\chi\blacksquare + \omega_\chi^2\,\delta\chi = \kappa\,s(t), \text{ con } \omega_\chi^2 \equiv m_\chi^2 + 2\,g\,\Sigma\blacksquare^2.$$

## 2) Lectura óptica y relación fase–$\chi$

La cavidad de longitud L y número de onda óptico $k = 2\pi/\lambda$ presenta un índice efectivo $n \approx 1 + \xi\,\chi$ ($\xi$: sensibilidad óptica). La fase óptica total $\phi = k\,n\,L$; por tanto la modulación por $\delta\chi$ (a frecuencia $\Omega$) produce:

$$\Delta\phi_{pk}(\Omega) = k\,L\,\xi\,|\delta\chi_{pk}(\Omega)|.$$

$$\delta\chi_{pk}(\Omega) = |\kappa\,s_{pk}| / \sqrt{[(\omega_\chi^2 - \Omega^2)^2 + \gamma^2\,\Omega^2]}.$$

Este $\Delta\phi$ se lee como modulación de fase del láser: el índice $\beta_{PM}=\Delta\phi_{pk}$ genera bandas laterales $\pm\Omega$ de potencia $P_{\pm1}/P_0 \approx \beta_{PM}^2/4$ (régimen lineal).

## 3) Fórmula operativa para $m_\chi$ y $\rho_{\mathbf{vac}}$

De (1)–(3), medido $\Delta\phi_{pk}(\Omega)$ y con k, L, $\xi$ conocidos, se obtiene, a una sola frecuencia $\Omega$:

$$[(\omega_\chi^2 - \Omega^2)^2 + \gamma^2\,\Omega^2] = (K\,A / \Delta\phi_{pk})^2, \text{ con } K \equiv k\,L\,\xi,\ A \equiv |\kappa\,s_{pk}|.$$

Para evitar la dependencia de A, se recomienda barrer dos frecuencias $\Omega\blacksquare$, $\Omega\blacksquare$ manteniendo constante $s_{pk}$. Definiendo $R \equiv [\Delta\phi_{pk}(\Omega\blacksquare)/\Delta\phi_{pk}(\Omega\blacksquare)]^2$, resulta el estimador de dos puntos (amortiguamiento pequeño, $\gamma\blacksquare\omega_\chi$):

$$\omega_\chi^2 \approx (\Omega\blacksquare^2 - \sqrt{R}\cdot\Omega\blacksquare^2)/(1 - \sqrt{R}).$$

Finalmente, la escala de energía del vacío del campo $\chi$ se fija por $m_\chi = (\blacksquare/c^2)\,\omega_\chi$ y su densidad local accesible en laboratorio (respecto al mínimo) es:

$$\Delta\rho_{vac}(\Omega) = ½\,m_\chi^2\,\blacksquare\delta\chi(\Omega)^2\blacksquare = ½\,(\blacksquare^2/c\blacksquare)\,\omega_\chi^2\,[\Delta\phi_{rms}(\Omega)/(k\,L\,\xi)]^2.$$

## 4) Configuración experimental (referencia)

• Cavidad óptica: $L \approx 5$–$20$ cm, finura $F > 10$■ (espejos fijos).
• Modulador de Fricción Cuántica (MFC): metamaterial de banda ancha, acoplo $\Sigma$–$\chi$ alto. Excitación eléctrica/RF a $\Omega/(2\pi) = 0.1$–$10$ GHz.
• Láser sonda: $\lambda = 1550$ nm o 1064 nm, estabilización sub-Hz. Detección homodina para fase.
• Barrido de $\Omega$: malla logarítmica para ubicar la resonancia $\omega_\chi$. Medir $\Delta\phi(\Omega)$, $P_{\pm1}(\Omega)$ y retroceso radiativo.
• Calibración de $\xi$: introducir un gas noble a presión conocida o usar un cristal de referencia con dn/dE tabulado, para fijar $K=kL\xi$.
• Blindaje: criogenia opcional y apantallamiento vibracional; referencia gemela sin MFC como control.

## 5) Presupuesto de errores y falsabilidad

• Ruido de disparo: $\delta\phi_{SN} \approx (2\eta P\tau/$■$\omega)^{-½}$. Integrar PSD hasta $1/\tau$.
• Efectos parásitos: Kerr electrónico, termoóptica, piezoacústica. Se distinguen por su distinta ley de escala con $P_{láser}$ y $\Omega$.
• Test nulo TMRCU: $\Delta\phi(\Omega)$ debe seguir un perfil Lorentziano centrado en $\omega_\chi$, independiente de la longitud de cavidad (a K fijo). Cambiar $\lambda$ y polarización para comprobar que $\xi$ es el único factor óptico.
• Criterio de refutación: si no aparece resonancia en todo el rango $\Omega$ con límites $\Delta\phi_{pk}$ ■ $10^{-8}$ rad a K típico, o si el perfil concuerda con un modelo puramente Kerr/termoelástico, se falsan $(m_\chi, g)$ en el marco TMRCU usado.

## 6) Comparativa rápida: ECD vs ERV–TMRCU

| Aspecto | Efecto Casimir Dinámico (clásico) | ERV–TMRCU (propuesto) |
|---|---|---|
| Perturbación | Espejo móvil / frontera acelerada | Oscilación $\Sigma \to \delta\chi$ en metamaterial (MFC) |
| Observable | Cuentas de fotones (estocástico) | Fase $\Delta\phi$ y bandas laterales (determinista) |
| Parámetro extraído | Tasa de pares | $m\chi$, g, $\Delta\rho$vac operativa |
| Uso tecnológico | Prueba de vacío activo | Ingeniería de coherencia / $\Sigma$–computing |

## 7) Autocrítica técnica y trazabilidad de la conclusión

**Cómo verifiqué la solidez del resultado.** (1) Partí del Lagrangiano TMRCU con interacción $g\,\Sigma^2\chi^2$ y masa escalar $m\chi$, que lleva, al linealizar en torno a Σ■, a un oscilador forzado para $\chi$ con frecuencia propia $\omega\chi$. (2) Vinculé $\chi$ con el observable óptico mediante $n \approx 1+\xi\chi$; la cavidad transforma $\delta n$ en fase $\Delta\phi$ medible con homodina. (3) Eliminé parámetros internos (ganancias desconocidas) usando el estimador de dos puntos (ecuación 6), de modo que $m\chi$ queda fijado únicamente por razones espectrales. (4) La energía de vacío accesible se definió operativamente como Δρvac=½ mχ²■δχ²■ (ecuación 7), válida cerca del mínimo del potencial, donde $\partial V/\partial\chi=0$.

**Posibles dudas y cómo se resuelven.**
• ¿Y si $\Delta\phi$ viene de Kerr o termoóptica? — Se separa por su ley de escala: Kerr $\propto P_{\text{láser}}$, termoóptica $\propto \Omega^{-1}$, mientras que la resonancia TMRCU fija un pico rígido en $\Omega=\omega\chi$, independiente de $P_{\text{láser}}$ (a K fijo).
• ¿Qué pasa si $\gamma$ no es pequeño? — Se usa barrido multi–$\Omega$ y ajuste completo de $(\omega\chi,\gamma)$ a la ecuación (5); el estimador (6) es solo la aproximación de baja disipación.
• ¿Necesito conocer $s_{pk}$? — Solo para extraer g. Para $m\chi$ basta con ratios espectrales (ecuación 6).
• ¿La fórmula de energía "total" del vacío? — En laboratorio medimos cambios $\Delta\rho vac$. La densidad absoluta depende de $V(\Sigma,\chi)$ global, pero el parámetro $m\chi$ fija su escala física.