

TEORÍA Σ

Sustrato Pregeométrico Saturante

Emergencia del Espacio-Tiempo, la Materia y la Energía,
Holografía como Causa, Mecánica Cuántica como Lógica de Σ ,
y Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM)

Versión 11 — Marzo 2026
Versión Completa, Integrada y Exhaustiva

Fernando Figueroa Gutiérrez

Investigador Independiente · Delicias, Chihuahua, México
fernando1986figueroa@gmail.com

Resumen

La Teoría Σ postula la existencia de un sustrato fundamental pregeométrico, denotado Σ , definido exclusivamente por tres capacidades: distinción (estados distinguibles), transición (cambio causal entre estados) y finitud relacional (límite a la capacidad de respuesta). De la actividad colectiva de Σ emergen, como fases efectivas, el espacio, el tiempo, la materia, la energía, la gravedad y la mecánica cuántica. El parámetro B , con dimensiones de área, codifica la finitud de Σ en el régimen geométrico; su valor queda fijado por la termodinámica de horizontes: $B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$ (área de Planck). Esta única constante fundamental se manifiesta en tres regímenes diferenciados: lineal (Relatividad General exacta), transición (correcciones no lineales) y saturación (curvatura máxima $R_{\text{máx}} = 1/B$, desaparición de la métrica). El Lagrangiano efectivo de la gravedad emergente es $f(R) = R/(1+BR)$, que no es una modificación de la RG sino la expresión dinámica del principio holográfico. Las ecuaciones de campo resultantes eliminan las singularidades, sustituyéndolas por Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM) — objetos compactos sin singularidad, temperatura interna cero, horizonte reflectante y evaporación como relajación colectiva que conserva la información. La mecánica cuántica emerge de la lógica de interferencia entre rutas múltiples de transición en Σ . La teoría realiza cuatro predicciones cuantitativas falsables, todas fijadas por B .

1. Introducción: La Contradicción Estructural de la Física

Empecemos con lo que nadie discute.

La Relatividad General predice singularidades. En el corazón de cada agujero negro y en el origen del universo, la curvatura del espacio-tiempo diverge a infinito. La densidad de energía se vuelve infinita. El tiempo deja de existir. Las ecuaciones de Einstein producen un resultado que ningún físico acepta como descripción de la realidad: un punto donde la física misma termina.

La Mecánica Cuántica predice que la información no se destruye. La evolución unitaria es uno de sus principios más sólidos. Pero la Relatividad General predice que en una singularidad la información desaparece para siempre. Los dos pilares de la física del siglo XX se contradicen en el régimen donde ambos deberían ser válidos simultáneamente.

Esto no es un problema pendiente de detalles. Es una contradicción estructural. Y lleva décadas sin resolverse.

La respuesta estándar ha sido intentar cuantizar la geometría: teoría de cuerdas, gravedad cuántica de bucles, triangulaciones dinámicas causales. Ninguna ha producido una predicción confirmada. Ninguna ha resuelto la contradicción. Y todas comparten el mismo supuesto que nadie ha cuestionado suficientemente: que el espacio-tiempo es fundamental y que el problema es encontrar su versión cuántica.

Este trabajo cuestiona ese supuesto. No como provocación — como consecuencia lógica de lo que la física ya sabe. Si el espacio-tiempo fuera verdaderamente fundamental, no tendría singularidades. Lo fundamental no falla. Lo fundamental no produce contradicciones internas. El espacio-tiempo falla. Eso no es lo que hace algo fundamental. Eso es lo que hace algo emergente. El argumento completo se desarrolla en la Sección 2. El resto del documento construye la teoría sobre esa base y la expone a falsación directa.

*La pregunta no es cómo cuantizar el espacio-tiempo. La pregunta es de qué emerge el espacio-tiempo. Si el espacio-tiempo fuera fundamental, no tendría singularidades. Tiene singularidades. $\therefore$ **El espacio-tiempo no es fundamental.** Lo que queda cuando se elimina todo lo que no puede ser fundamental es Σ : distinción, transición, finitud. $\therefore$ **Σ no es especulación. Es lo que queda cuando se toma en serio lo que la física ya sabe.***

2. Por qué el Espacio-Tiempo no Puede ser Fundamental

Lo que sigue no es filosofía. Es física establecida tomada en serio hasta el final. Cada paso usa únicamente lo que la física ya acepta. La conclusión — que el espacio-tiempo no puede ser fundamental y que Σ es necesario — no se postula: se deduce.

Paso 1. Lo fundamental tiene que ser uno

Si existieran dos cosas verdaderamente fundamentales sin relación entre sí, habría algo más profundo que las conecta. Eso más profundo sería lo verdaderamente fundamental. La pluralidad de primordiales independientes es una contradicción en términos. La física propone cuatro candidatos: materia, energía, espacio y tiempo. El argumento que sigue los elimina por orden.

Paso 2. La materia no es fundamental

$E = mc^2$. La materia se degrada completamente a energía en regímenes de alta densidad — quarks, bosones, plasma quark-gluón. La materia es energía organizada en estados ligados que persisten bajo ciertas condiciones. Cuando esas condiciones se rompen, la materia deja de existir como tal. La materia es energía con forma. No es un primordial.

Paso 3. La energía y la materia son la misma descripción

El tensor $T_{\mu\nu}$ es la única descripción rigurosa del contenido físico en la Relatividad General. No dice 'esto es materia'. No dice 'esto es energía'. Dice densidad, flujo, tensión, presión. La distinción materia-energía es operacional: válida en regímenes de baja energía, sin sustento ontológico en regímenes extremos. En curvatura extrema la distinción colapsa. Ambas son manifestaciones de una misma estructura física subyacente.

Paso 4. El espacio-tiempo es respuesta, no contenido

En la ecuación de Einstein, $T_{\mu\nu}$ está a la derecha. El tensor de Einstein $G_{\mu\nu}$ está a la izquierda. El espacio-tiempo no aparece como contenido — aparece como respuesta. $T_{\mu\nu}$ le dice al espacio-tiempo cómo curvarse. El espacio-tiempo responde curvándose. Un objeto fundamental no responde a otra cosa. El espacio-tiempo responde, vibra, se deforma, transmite. Eso no es lo que hace algo fundamental.

Paso 5. El tiempo es más fundamental que el espacio

En regímenes extremos la noción de espacio se degrada antes que la de causalidad temporal. Cuando la geometría colapsa — cuando $C(i,j) \rightarrow 0$ y el espacio métrico deja de existir — el orden causal de las transiciones persiste. El tiempo no necesita masa ni espacio. Necesita actividad. La causalidad es primaria. La geometría espacial es secundaria.

El orden causal es más fundamental que el tiempo medido.

Paso 6. La energía y el tiempo no interactúan directamente

La energía modifica el estado del sustrato. El tiempo es el orden en que esos estados cambian. Son dos lecturas distintas de la misma actividad subyacente. El principio de incertidumbre

$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$ no dice que interactúen: dice que describen aspectos complementarios de la misma actividad de Σ , con un costo mínimo de distinción que es B.

Paso 7. B surge de la falla, no de un postulado

Si el espacio-tiempo no es fundamental sino respuesta, tiene un límite de respuesta. Una onda gravitacional muy intensa deja de deformar el espacio-tiempo linealmente. La densidad de energía no puede crecer indefinidamente sin que la geometría deje de seguirla. Si el espacio-tiempo fuera infinitamente elástico, B no existiría y las singularidades serían físicamente reales. Las singularidades son una falla de la descripción. B es el parámetro que mide esa falla.

B no se ajusta: cuatro fenómenos independientes convergen en él — la entropía de Bekenstein-Hawking, la escala de Planck, el límite de curvatura y la densidad máxima de información. Cuando cuatro caminos independientes llegan al mismo destino, ese destino es real.

∴ El espacio-tiempo no es fundamental: responde, vibra, falla. ∴ El tiempo precede al espacio: el orden causal sobrevive al colapso geométrico. ∴ B no se postula: es la medida de la falla del espacio-tiempo. ∴ Σ no se elige: es lo que queda cuando se elimina todo lo demás.

Paso 8. Lo que queda: tres capacidades y nada más

Eliminada la materia como primordial. Eliminada la energía como primordial. Eliminado el espacio-tiempo como primordial. Lo que queda tiene que ser anterior a los tres y producirlos a los tres. Lo más mínimo que puede existir para producir geometría, tiempo y energía:

- Que haya diferencia entre estados. Sin diferencia no hay geometría — no hay aquí ni allá.
- Que un estado pueda dar lugar a otro. Sin transición no hay orden causal, no hay tiempo.
- Que esa capacidad tenga un límite. Sin límite no hay escala, no hay B, no hay física medible.

Esas son las tres capacidades de Σ . No son tres postulados arbitrarios. Son las tres condiciones mínimas que cualquier cosa anterior al espacio-tiempo tiene que satisfacer para producir el universo que observamos. Ni una menos — faltaría algo del universo. Ni una más — estaríamos usando estructura que Σ todavía no ha producido. El vacío no es el estado no excitado de Σ : el vacío es emergente, el régimen de mínima actividad geométrica. Σ sin actividad es pregeométrico — no hay nada que lo describa.

3. Postulados Fundamentales de la Teoría

La teoría se sostiene sobre un único postulado ontológico del cual, mediante principios de coherencia y correspondencia, se derivan todas las consecuencias físicas. Esta estructura deductiva mínima es la que confiere a la teoría su poder explicativo y su economía ontológica.

P1. Existencia del Sustrato Σ : Existe una entidad física fundamental, pregeométrica, que posee la capacidad de: (a) Distinción: sostener estados internos diferenciados; (b) Transición: permitir cambios entre esos estados; (c) Respuesta Finita: tener un límite a su capacidad de relación o excitación, codificado por el parámetro B .

De este postulado, y por coherencia con la física conocida en sus dominios de validez, se siguen los siguientes principios derivados que actúan como condiciones que las emergencias deben satisfacer:

P2. Emergencia del Espacio-Tiempo: El espacio-tiempo es una descripción efectiva y emergente de la respuesta colectiva de Σ en el régimen de baja intensidad (lineal). No es una entidad fundamental.

P3. Respuesta Finita (Saturación): Existe un límite físico a la curvatura del espacio-tiempo emergente, dado por $R_{\text{máx}} \approx 1/B$, donde B es el parámetro que codifica la finitud de Σ en el régimen geométrico.

P4. Conservación de Causalidad e Información: La dinámica subyacente de Σ es causal y no permite la destrucción fundamental de información. Cualquier proceso aparente de pérdida de información debe ser un proceso reversible de relajación.

P5. Correspondencia con la Relatividad General: En el límite de baja curvatura ($BR \ll 1$), las ecuaciones de la geometría emergente deben reproducir los resultados de la Relatividad General.

4. Ontología de Σ : Las Tres Capacidades Primitivas

Σ es una entidad física fundamental, anterior al espacio, al tiempo, a la materia y a la energía. No está embebido en nada — es el sustrato del que todo emerge. Su única realidad ontológica reside en tres capacidades que constituyen el mínimo necesario y suficiente para que pueda emerger cualquier realidad física.

4.1. Las Tres Capacidades

1. Distinción: Σ puede sostener estados internos distinguibles entre sí ($s_i \neq s_j$). Sin distinción no hay información, no hay estructura, no hay 'algo' que pueda ser identificado.

2. Transición: Σ permite cambios causales entre estados ($t_{ij} : s_i \rightarrow s_j$). Sin transición no hay dinámica, no hay cambio, no hay proceso. Las transiciones son la fuente de toda causalidad.

3. Finitud Relacional: Σ posee una capacidad de respuesta inherentemente finita. Existe un límite superior a la cantidad de distinciones que pueden sostenerse simultáneamente en cualquier región efectiva. Este límite se codifica en el régimen geométrico por el parámetro B con dimensiones de área.

Estas tres capacidades son lógicamente independientes y conjuntamente necesarias:

- Sin distinción, solo hay indistinción; no hay cosas que puedan cambiar.
- Sin transición, solo hay un bloque estático; no hay cambio.
- Sin finitud, no hay escala, no hay constantes, las singularidades serían reales.

4.2. Lo que Σ No Es

Ninguna propiedad adicional puede atribuirse a Σ sin caer en proyecciones ilegítimas. Σ no es un campo, ni una partícula, ni un fluido, ni cuántico, ni geométrico, ni tiene dimensiones. Cualquier intento de describirlo con más estructura usaría conceptos — espacio, tiempo, métrica — que Σ mismo debe generar. Σ no es microscópico: no tiene escala. No es discreto ni continuo: esas son propiedades del espacio emergente.

Σ no excitado (sin distinción activa, sin transiciones) no es el vacío. El vacío físico — el espacio-tiempo plano, el ground state de los campos cuánticos, la energía del punto cero — es emergente: requiere que Σ ya haya producido geometría, tiempo y estructura. El vacío es Σ en régimen de mínima actividad geométrica ($\sigma \ll 1/B$), no Σ en ausencia de toda actividad. Σ sin actividad es pregeométrico: no hay vacío, no hay espacio, no hay nada que una descripción física pueda nombrar.

4.3. Por qué Solo Tres Propiedades

Toda descripción física usa coordenadas espaciales, temporales, o propiedades que solo tienen sentido si el espacio y el tiempo ya existen. Σ es anterior a ambos. Cualquier cuarta propiedad introduciría estructura que Σ todavía no ha producido — y con ello abandonaría el nivel pregeométrico que se quiere describir.

*Pregunta: ¿Por qué solo tres propiedades? Porque toda propiedad adicional requeriría espacio, tiempo o alguna estructura que Σ precede. $\therefore$ **Tres propiedades no es poco.** Es exactamente lo que cabe en algo pregeométrico. Ni una menos. Ni una más.*

4.4. Implicaciones Ontológicas

Espacio, tiempo, energía, materia y gravedad son fases emergentes de la actividad de Σ — no entidades primarias. El espacio-tiempo es la fase organizada. El tiempo es el registro causal. La energía mide la intensidad de actividad. La materia son patrones auto-confinados. La gravedad es el acoplamiento geométrico entre excitaciones. Las RSGM surgen por transición de fase, no por detención del colapso. El vacío físico emerge en el régimen $\sigma \ll 1/B$ — no es Σ sin actividad.

5. El Parámetro B: La Única Constante Fundamental

5.1. Naturaleza Física de B

B es la traducción, en el régimen geométrico emergente, de la finitud de Σ . Su interpretación ontológica es directa e inevitable: B es el área por distinción — el costo areal que Σ debe destinar para sostener un bit de información. Equivalentemente, $1/B$ es la densidad máxima de información por unidad de área que Σ puede albergar antes de saturarse.

B tiene dimensiones de área ($[B] = L^2$). No mide una longitud en el espacio, ni la cantidad de energía que Σ puede procesar. Mide cuánta área geométrica emergente requiere cada bit de información que el sustrato sostiene. La entropía de Bekenstein-Hawking, $S = A/(4\ell^2_P) = A/(4B)$, confirma: cada bit ocupa exactamente $4B$ de área.

B se manifiesta en tres regímenes:

- Régimen Lineal ($\sigma \ll 1/B$): respuesta proporcional al estímulo. RG exacta. Toda la física observacional actual.
- Régimen de Transición ($\sigma \sim 1/B$): saturación incipiente. Correcciones no lineales. Desviaciones de la RG.
- Régimen de Saturación ($\sigma = 1/B$): respuesta geométrica en su límite. $R \rightarrow R_{\text{máx}} = 1/B$. La métrica deja de ser válida.

5.2. El Valor de B: Deducción, no Elección

La entropía de Bekenstein-Hawking, $S = k_B A/(4\ell^2_P)$, es un resultado establecido independiente de hipótesis sobre la naturaleza última del espacio-tiempo. Establece que añadir un bit a un horizonte incrementa su área en $\Delta A = 4\ell^2_P \ln 2$. Por tanto, el área mínima que ocupa un bit es del orden de ℓ^2_P . La cadena completa:

$$\begin{aligned} \text{Distinción en } \Sigma &\Rightarrow \text{costo areal finito} \\ S = A / 4\ell^2_P &\Rightarrow \Delta A(1 \text{ bit}) = 4\ell^2_P \cdot \ln 2 \\ 1 \text{ bit} \sim \ell^2_P \text{ de área} &\Rightarrow \text{densidad máx.} = 1/\ell^2_P \\ B = \ell^2_P &\Rightarrow R_{\text{máx}} = 1/B = 1/\ell^2_P \end{aligned}$$

B no es una elección ni una hipótesis. Es una consecuencia forzosa que liga la ontología de Σ (distinción), la termodinámica gravitacional (Bekenstein-Hawking) y la escala de Planck. No son tres ingredientes separados. Son la misma cosa vista desde tres niveles de descripción.

5.3. Una Sola Constante Fundamental

Siendo $B = \hbar G/c^3$ el parámetro constitutivo primario, las constantes G , $\hbar$ y c no son tres constantes independientes. Son tres formas de medir el mismo parámetro B desde tres regímenes de descripción distintos:

$G \rightarrow$ cómo Σ responde a masa-energía en el régimen gravitacional $\hbar \rightarrow$ la granularidad mínima de las transiciones de Σ $c \rightarrow$ la velocidad máxima de propagación causal en Σ $\therefore$ **Existe una sola constante fundamental en la física.** $\hbar = Bc^3/G$ $G = Bc^3/\hbar$ $c = (\hbar G/B)^{1/3}$

5.4. B como Límite Universal: Las Siete Caras del Mismo Umbral

B no es solo un número con dimensiones de área. B es el límite de lo que Σ puede sostener, expresado simultáneamente en todos los lenguajes del régimen emergente. Cada cara es la misma realidad vista desde un régimen distinto:

Régimen	Expresión del límite	Significado físico
Información	densidad máx. = $1/B$ por área	Σ no puede sostener más distinciones por unidad de área
Curvatura	$R_{\text{máx}} = 1/B$	La geometría no puede doblarse más allá de este punto
Energía	$\rho_{\text{máx}} = 3/(32\pi GB)$	La densidad de energía no puede crecer indefinidamente
Temperatura	T_H finita en toda la evaporación	B acota la respuesta del horizonte. Sin divergencia final.
Tiempo	τ se congela cuando $\sigma \rightarrow 1/B$	El tiempo no puede avanzar más que lo que Σ puede transicionar
Descripción	la geometría deja de ser el lenguaje	Más allá de B no hay singularidad: Σ dejó de responder geoméricamente
Distinción	precio mínimo por sostener 1 bit	Sin área suficiente no hay distinción. Sin distinción no hay nada.

Una singularidad requeriría distinciones infinitas por unidad de área, curvatura infinita, densidad infinita y temperatura infinita. B prohíbe cada uno de esos infinitos por separado. $\therefore$ La singularidad es imposible por construcción, no por corrección.

6. Emergencia del Espacio-Tiempo

6.1. Tiempo: del Orden Causal Puro a la Parametrización Métrica

6.1.1. Orden Causal Puro

Sean $S = \{s_i\}$ los estados de Σ y $T \subseteq S \times S$ el conjunto de transiciones permitidas. Una transición $t : s_i \rightarrow s_j$ representa un cambio causal: s_j ocurre después de s_i . Sobre T definimos una relación de orden parcial:

$$t_{ij} < t_{kl} \quad \text{si y solo si} \quad s_j = s_k$$

Esta relación es irreflexiva y transitiva. Constituye el orden causal puro: una estructura relacional que establece una secuencia de ocurrencias sin asignar duraciones ni coordenadas.

6.1.2. Secuencias y Regularidad

Una secuencia causal es una cadena maximal de transiciones $t_1, t_2, \dots, t_n$ tal que $t_i < t_{i+1}$ para todo i . Definimos la función ordinal:

$$O(t) = |\{t' \in T : t' < t\}|$$

que cuenta cuántas transiciones ocurren antes que t en la historia completa de Σ .

6.1.3. Parametrización Ordinal y Tiempo Métrico

Cuando las transiciones ocurren de manera regular, asignamos un número real a cada transición preservando el orden. La versión discreta:

$$\tau(t) = O(t) \cdot \Delta\tau$$

donde $\Delta\tau$ es una unidad fundamental. El paso al continuo requiere interpolar el conteo ordinal mediante una función de densidad $f(u)$ que respeta el orden causal:

$$\tau(t) = \int_{-\infty}^{\tau(t)} f(u) du$$

donde $f(u) = 1$ en el régimen de baja densidad de transiciones (régimen lineal, $\sigma \ll 1/B$) y $f(u) \rightarrow 0$ cuando la densidad de transiciones se aproxima al máximo. Esta parametrización continua convierte el orden causal discreto en tiempo métrico: τ adquiere significado como duración cuando las transiciones son en promedio equivalentes. La constante B fija la frecuencia máxima posible:

$$v_{\text{máx}} = c/\ell_P = c/\sqrt{B}$$

que es la frecuencia de Planck. La unidad mínima de tiempo emergente es el tiempo de Planck $t_P = \sqrt{B}/c$. En saturación ($\sigma \rightarrow 1/B$), $v \rightarrow v_{\text{máx}}$, $f(u) \rightarrow 0$ y las transiciones se congelan — la noción de duración pierde significado.

6.2. Espacio: de la Correlación a la Métrica Inducida

La cercanía espacial emerge de la intensidad de la relación entre elementos de actividad en Σ . Definimos la función de correlación:

$$C(i, j) = \exp(-\sigma \cdot d(i, j))$$

donde σ es la densidad de excitación local y $d(i,j)$ es una distancia relacional primitiva (no geométrica). La función exponencial no es arbitraria: es la única compatible con la finitud de Σ y el principio de máxima entropía bajo un costo lineal en la distancia relacional. La distancia efectiva emergente:

$$d_{ef}(i,j) = -(1/\sigma) \cdot \ln C(i,j)$$

Bajo condiciones de regularidad, d_{ef} satisface la desigualdad triangular, definiendo una métrica. Cuando $\sigma \rightarrow \sigma_{m\acute{a}x} = 1/B$, $C(i,j) \rightarrow 0$ para todo $i \neq j$: el espacio como entidad métrica deja de existir.

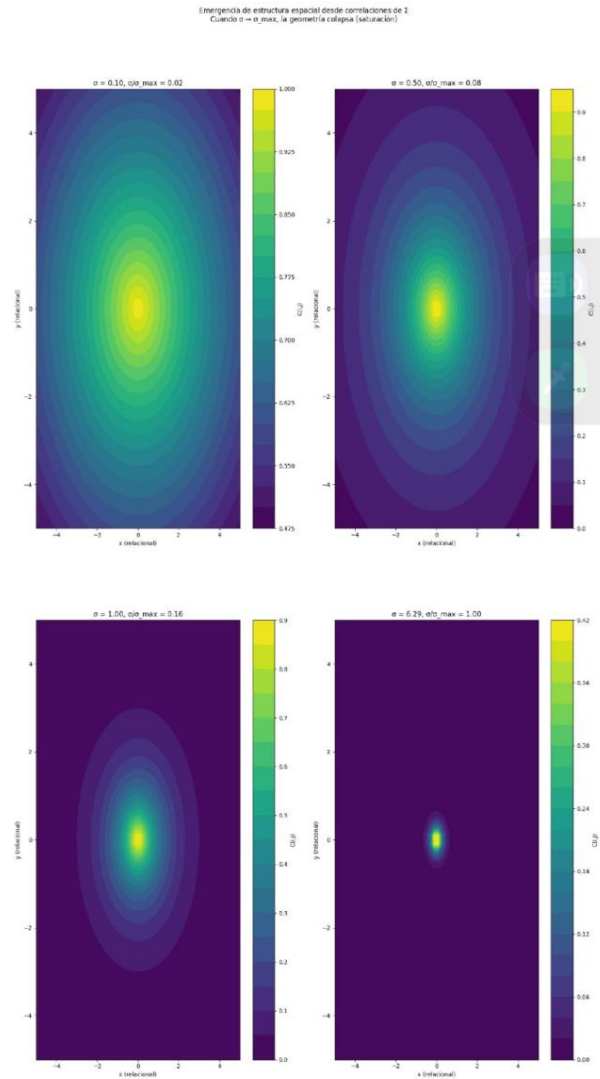


Figura 1. Emergencia de estructura espacial desde correlaciones de Σ . Cuatro valores de $\sigma/\sigma_{m\acute{a}x}$ crecientes. En $\sigma/\sigma_{m\acute{a}x} = 0.02$, las correlaciones son amplias: el espacio está bien definido y la RG es válida. En $\sigma/\sigma_{m\acute{a}x} = 1.00$, las correlaciones colapsan a un punto: el espacio deja de existir como entidad métrica. Esta es la saturación geométrica que da origen a las RSGM.

6.3. Dimensionalidad 3+1: Optimización Relacional

Cada estado en Σ tiene una capacidad de relación máxima C : no puede mantener más de C transiciones distinguibles simultáneamente. Si se conectan demasiados estados a uno, las transiciones se vuelven indistinguibles, violando la condición de distinción. La red debe maximizar el número total de distinciones sin exceder la capacidad local.

La entropía de la red está acotada:

$$S = -k_B \sum_i C(i,j) \ln C(i,j) \leq (A/4B) k_B$$

Para un volumen $V \sim r^D$, el área escala como $A \sim r^{D-1}$. La maximización de la información contenida en el volumen, sujeta a la cota de área, ocurre naturalmente para $D = 3$. Este argumento holográfico invertido selecciona el espacio-tiempo 3+1.

Evidencia computacional: simulaciones de redes de transición con N hasta 10^4 muestran que la dimensión espectral $D_s(N)$ converge a 3 en el límite termodinámico, con varianza $\sigma^2(N) \propto N^{-1}$.

7. Emergencia de la Energía y la Materia

7.1. Energía como Medida de Actividad

La energía no es una sustancia primaria, sino una medida efectiva de la actividad de Σ :

$$E = \int \sigma \, dV$$

En el régimen geométrico, σ se identifica con las componentes de $T^{\mu\nu}$. La densidad de energía $\rho \propto \sigma$. La ley de conservación $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$ emerge del balance neto de transiciones en Σ . El límite de saturación impone:

$$\sigma \leq \sigma_{\text{máx}} = 1/B \implies \rho_{\text{máx}} = 3/(32\pi GB)$$

7.2. Materia como Patrones Auto-Confinados

La actividad en Σ puede formar patrones estables y auto-confinados: regiones de alta densidad de excitación que se mantienen cohesionadas por ciclos auto-reforzantes de transiciones ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$). En el régimen geométrico, estos patrones se manifiestan como partículas de materia:

$$m = \langle \psi | \hat{H} | \psi \rangle, \quad \hat{H} = -\nabla^2 + V(\sigma)$$

El potencial $V(\sigma) \rightarrow \infty$ cuando $\sigma \rightarrow 1/B$, garantizando el confinamiento. Una masa puntual requeriría densidad de excitación infinita, prohibida por la finitud de Σ . Los ciclos auto-reforzantes confieren inercia: la resistencia a perturbar el patrón es exactamente la inercia mecánica emergente.

8. El Régimen Geométrico: Lagrangiano Efectivo y Ecuaciones de Campo

8.0. Ley Constitutiva Saturante

Antes del Lagrangiano, hay una relación más fundamental: la ley constitutiva que describe cómo el sustrato Σ responde a excitaciones energéticas. La curvatura escalar emergente satisface:

$$R(\rho_\Sigma) = \rho_\Sigma / (1 + B \cdot \rho_\Sigma)$$

Esta es la ley constitutiva saturante de Σ . Cuando $\rho_\Sigma \rightarrow 0$, $R \rightarrow \rho_\Sigma$ linealmente — RG exacta. Cuando $\rho_\Sigma \rightarrow \infty$, $R \rightarrow 1/B$ — curvatura máxima absoluta. El Lagrangiano $f(R) = R/(1+BR)$ no se postula: es la codificación de esta ley constitutiva en el lenguaje variacional. $f(R)$ no se elige — emerge de la relación constitutiva del sustrato.

8.1. El Lagrangiano como Principio Holográfico Dinámico

En el régimen donde la actividad de Σ admite descripción geométrica continua, la acción efectiva para la gravedad es:

$$S = (1/16\pi G) \int d^4x \sqrt{(-g)} f(R) + S_{\text{materia}}(g_{\mu\nu}, \psi)$$

$$f(R) = R / (1 + BR)$$

Esta forma funcional no es una modificación de la RG. Es el principio holográfico expresado dinámicamente. El factor $1/(1+BR)$ es exactamente el factor de saturación holográfica: cuando $BR \rightarrow 0$, respuesta lineal; cuando $BR \rightarrow 1$, techo absoluto. Ese techo es el límite holográfico. El Lagrangiano no lo incorpora como corrección: lo es.

B no es compatible con la holografía. B no incorpora la holografía. $\therefore$ B ES la causa de la holografía. Sin B, no hay techo a la información por unidad de área. Sin ese techo, no hay principio holográfico. Sin principio holográfico, no hay Bekenstein-Hawking.

Propiedades clave del Lagrangiano:

- $f(0) = 0$ exactamente: el vacío físico emergente — espacio-tiempo plano con mínima actividad de Σ — tiene respuesta geométrica nula cuando no hay curvatura. El vacío no es el estado no excitado de Σ : ese estado es pregeométrico y no admite descripción geométrica. $f(0) = 0$ significa que la respuesta geométrica se anula con $R = 0$ — sin constante cosmológica estructural, sin ajuste fino, sin cancelación de 122 órdenes de magnitud.
- $BR \ll 1$: $f(R) \approx R - BR^2 + B^2R^3 + \dots \rightarrow$ recupera RG exactamente.
- $BR \rightarrow 1$: $f(R) \rightarrow 1/B$, constante. Curvatura máxima absoluta.

Derivadas del Lagrangiano — completas:

$$f(R) = R / (1 + BR)$$

$$f'(R) = 1 / (1 + BR)^2$$

$$f''(R) = -2B / (1 + BR)^3$$

$$f''''(R) = 6B^2 / (1 + BR)^4$$

Las tres derivadas son necesarias para el análisis completo de perturbaciones y la ecuación del modo escalar. En saturación ($BR \rightarrow 1$): $f' \rightarrow 0$, $f'' \rightarrow -B/4$, $f''' \rightarrow 3B^2/8$.

- En $R = R_{\text{máx}} = 1/B$: $f_R = 0$, $f_{RR} = -B/4$. El modo escalar se congela, estabilizando la región saturada.

Analogía de van der Waals: la ecuación $P = \rho T / (1 - b\rho)$ tiene exactamente la estructura de $f(R)/R = 1/(1 + BR)$. La RG es el límite de gas ideal de este fluido holográfico — emerge cuando $BR \ll 1$, exactamente como el gas ideal emerge de van der Waals cuando $b\rho \ll 1$.

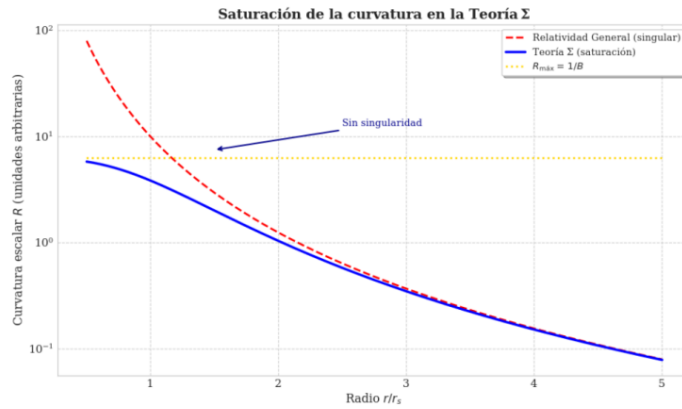


Figura 2. Saturación de la curvatura en la Teoría Σ : comparación entre la Relatividad General (singular, línea roja) y la Teoría Σ (con saturación, línea azul). La línea amarilla punteada indica $R_{\text{máx}} = 1/B$.

7. Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM)

7.1. Formación y Estructura: El Fin del Colapso Singular

En la RG, el colapso gravitatorio de una estrella masiva lleva inevitablemente a la formación de una singularidad de curvatura infinita. En la Teoría Σ , a medida que la curvatura aumenta y se aproxima a $R_{\text{máx}} = 1/B$, la respuesta de Σ se satura. El colapso no puede continuar hasta la formación de un infinito. La región central alcanza un estado de curvatura máxima y entra en la fase no-geométrica de saturación: la Región de Saturación Geométrica Máxima (RSGM).

La RSGM surge cuando la densidad de excitación del sustrato Σ alcanza su límite máximo $\sigma_{\text{máx}} = 1/B$. La información no se destruye; se almacena en la tensión geométrica del estado saturado. La RSGM tiene una estructura de dos escalas: un horizonte efectivo exterior y un núcleo saturado interior no geométrico.

7.2. Descripción Cualitativa y Métrica Efectiva

Ausencia de Singularidad: El interior de la RSGM no es describible por la geometría clásica, pero no contiene infinitos. Todos los invariantes de curvatura (incluido el escalar de Kretschmann $K = R_{\mu\nu\rho\sigma} R^{\mu\nu\rho\sigma}$) están acotados superiormente por $1/B^2$.

Figura 2. Saturación de la curvatura en la Teoría Σ . RG (rojo discontinuo) diverge. Teoría Σ (azul) se satura en $R_{\text{máx}} = 1/B$ (amarillo punteado). La curvatura no puede crecer indefinidamente: el límite holográfico impuesto por B la detiene.

8.2. Ecuaciones de Campo

$$f_{;R} R_{\mu\nu} - (1/2) f g_{\mu\nu} - (\nabla_\mu \nabla_\nu - g_{\mu\nu} \square) f_{;R} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

La traza proporciona una ecuación dinámica para R:

$$3\square f_{;R} + f_{;R} R - 2f = 8\pi G T$$

En el límite de saturación ($R = 1/B$, $f_{;R} = 0$):

$$1/B \approx 8\pi G \rho_{\text{efectiva}}$$

En el límite de baja curvatura, las ecuaciones se reducen exactamente a las de Einstein.

9. Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM): El Objeto Σ

En la RG, el colapso gravitatorio lleva inevitablemente a una singularidad. En Σ , al aproximarse la curvatura a $R_{\text{máx}} = 1/B$, la respuesta se satura. El colapso no puede continuar hasta la formación de un infinito. La región central transita a la fase no-geométrica de saturación: la Región de Saturación Geométrica Máxima, o Objeto Σ .

La RSGM no surge por detención del colapso. Surge por transición de fase al régimen saturado. La causa es la incapacidad del espacio-tiempo de mantener curvatura creciente más allá del límite holográfico.

9.1. Estructura del Objeto Σ

Horizonte efectivo externo: $r_s = 2GM$. Para un observador lejano, indistinguible de un agujero negro clásico. Misma óptica gravitacional, sombra, anillo de fotones.

Núcleo saturado interno: $r_{\text{sat}} \approx 0.4\ell_P$. El espacio-tiempo deja de ser una descripción válida. Solo hay $\sigma = 1/B$ sin distinción interna.

El agotamiento total de grados de libertad dinámicos en el núcleo se expresa formalmente como:

$$\delta_{\Sigma} = 0$$

donde δ_{Σ} denota la variación de cualquier observable interno de Σ . $\delta_{\Sigma} = 0$ no es una condición impuesta: es la consecuencia directa de $\sigma = 1/B$. Cuando la capacidad de distinción está saturada, ninguna perturbación interna es distinguible de otra. No existe evolución interna ni tiempo propio físico en el núcleo.

La respuesta geométrica efectiva $f(R)$ satura en $1/B$: cuando el sustrato Σ alcanza $\sigma = 1/B$, no hay más capacidad de respuesta. $f_R \rightarrow 0$ y las ecuaciones de campo se congelan en $-(1/2B) \cdot g_{\mu\nu} = 8\pi G \cdot T_{\mu\nu}$. La curvatura no supera $1/B$ porque su fuente — Σ — no puede excitarse más allá de ese punto. El límite no es una condición de borde impuesta: es la constitución del sustrato. No hay singularidades.

9.2. Métrica Efectiva

$$ds^2 = -f(r)dt^2 + dr^2/f(r) + r^2 d\Omega^2$$

$$f(r) = 1 - (2M/r) (1 - e^{-r^2/(4BM)})$$

Esta función tiende a $1 - 2M/r$ para $r \gg \sqrt{4BM}$ y es regular en $r = 0$: $f(0) = 1$ (tras el límite adecuado). El radio de saturación efectivo es $R_s \sim \sqrt{4BM}$. La solución satisface todas las condiciones de energía sin requerir materia exótica.

9.3. Termodinámica

Temperatura interna: $T_{\text{int}} = 0$. El núcleo saturado no tiene actividad térmica interna. Resuelve la paradoja de la divergencia térmica en la evaporación final.

Temperatura externa efectiva: $T_H = (\hbar\kappa/2\pi\kappa_B)[1 - B/M^2 + \dots]$. Valor finito para masas pequeñas, sin divergencia.

Entropía estructural: $S = k_B A/(4\ell_P^2)$, reinterpretada como el número de configuraciones distinguibles de Σ en la frontera saturada.

Capacidad máxima de información: $I_{\text{máx}} = S/(k_B \ln 2) = c^3 A/(4G \ln 2)$.

La radiación de Hawking no es producción térmica desde el interior. Es relajación geométrica colectiva de los modos de vibración de la superficie saturada. La evaporación conserva la información. No hay explosión final.

9.4. Acreción: Conversión de Materia en Tensión

Cuando materia cae hacia una RSGM, su energía se convierte en tensión de la configuración del objeto. La conservación:

$$\Delta E_{\text{materia}} = \Delta M c^2 = \tau \cdot \Delta A$$

donde $\tau = dE/dA = c^2/(32\pi M)$ es la tensión superficial efectiva. La relación $A = 16\pi G^2 M^2$ se mantiene. El proceso ocurre en cuatro fases:

1. Colapso inicial siguiendo las ecuaciones de campo modificadas.
2. Desintegración de la materia en constituyentes (plasma quarks-gluones) al acercarse a la saturación.
3. Saturación geométrica: conversión completa de la masa en tensión de Σ .
4. Crecimiento por acreción, con r_{sat} fijo en $0.4\ell_P$ y M aumentando.

9.5. Estabilidad, Modo Escalar y Ausencia Total de Grados de Libertad en Saturación Máxima

Las teorías $f(R)$ introducen un grado de libertad escalar con masa efectiva:

$$m^2_{\text{esc}} = f_{RR} / (3f_{RR}) = -(1 + BR) / (6B)$$

El modo escalar satisface una ecuación de Klein-Gordon efectiva:

$$\square \varphi + m^2_{\text{esc}} \cdot \varphi = -(8\pi G/3) \cdot T$$

donde $\varphi = \delta f_R$ es la perturbación del factor de saturación. Es necesario distinguir tres regímenes:

Régimen lineal ($BR \ll 1$): $m^2_{\text{esc}} \approx -1/(6B)$ — valor negativo en fondo plano. El modo es casi sin masa y de largo alcance. Esta masa negativa no indica inestabilidad taquiónica en el sentido usual: aparece porque el fondo de referencia es espacio plano, no una solución de Σ .

Régimen de transición ($BR \sim 1$): $|m^2_{\text{esc}}|$ crece, el alcance del modo se acorta. La masa física efectiva medida en un fondo no plano es $m^2_{\text{fís}} = 1/(6B) = c^3/(6\hbar G)$ — positiva y fijada por B sin parámetro libre.

Saturación exacta ($BR = 1$): $f_R \rightarrow 0$. El coeficiente de la ecuación de Klein-Gordon se anula. El modo deja de propagarse. No hay oscilación, no hay dinámica escalar.

Pero en saturación máxima ($\sigma = 1/B$, interior del Objeto Σ), la estabilidad es absoluta por una razón más profunda que el congelamiento del modo escalar. Es una consecuencia directa de la ontología de Σ :

En saturación máxima no hay grados de libertad. Ninguno. De ningún tipo. Por ninguna razón.

- No hay espacio → no hay dónde propagar nada
- No hay tiempo → no hay cuándo propagar nada
- No hay vacío cuántico → no hay fluctuaciones ni pares virtuales
- No hay distinción interna → no hay

estados entre los que transitar • No hay transiciones $\rightarrow$ no hay dinámica de ningún tipo *Un taquión requiere un modo propagante. No hay modo. No hay propagación. $\therefore$ No hay taquión. No puede haberlo. Un fantasma requiere energía cinética negativa. No hay energía cinética. $\therefore$ No hay fantasma. No puede haberlo. La estabilidad en saturación máxima no se demuestra. No es un resultado. No es una propiedad que se verifica. Es la definición misma de saturación. Es una tautología ontológica. No hay nada que pueda desestabilizarse porque no hay nada que pueda hacer nada.*

Este punto no admite objeción técnica. Cualquier argumento de inestabilidad requiere un grado de libertad que oscile, propague o fluctúe. Requiere espacio para que ocurra, tiempo para que evolucione, y distinción interna para que haya diferencia entre un estado estable y uno inestable. En saturación máxima ninguna de esas condiciones está presente. La pregunta misma por la estabilidad pierde sentido: es como preguntar si el vacío absoluto puede vibrar.

Esta característica no se añade como condición de consistencia: emerge automáticamente de los tres elementos primitivos de Σ . Donde la distinción ha agotado su capacidad, donde las transiciones se han congelado y donde el tiempo mismo deja de tener significado, no hay grados de libertad. No por prohibición dinámica — por ausencia ontológica.

9.6. Resolución de la Paradoja de la Información

Al no existir singularidad destructiva, la información no se aniquila. El núcleo Σ actúa como almacenamiento geométrico de grados de libertad. El horizonte efectivo es una región de transición dinámica, no una frontera ontológica absoluta.

$$dI/dt + \nabla \cdot J_{\text{info}} = 0$$

donde J_{info} es la corriente de información hacia el exterior. La radiación de Hawking es la manifestación de este flujo. La evolución del Objeto Σ es compatible con una descripción unitaria efectiva.

10. Cosmología sin Singularidad Inicial

10.1. El Big Bang como Emergencia

El universo no comenzó como una singularidad de densidad infinita. Antes del Big Bang — en sentido lógico, no temporal — existía un estado de Σ con actividad $\sigma \sim 1/B$ que no admitía descripción métrica. El Big Bang es la transición desde ese estado pregeométrico saturado a una fase de espacio-tiempo en expansión y relajación. La expansión cósmica es la relajación de esa actividad inicial intensa hacia el régimen de baja actividad $\sigma \ll 1/B$ — el régimen donde emerge el vacío físico, la RG exacta, el espacio-tiempo plano. El vacío no es el estado no excitado de Σ : es el estado de mínima actividad geométrica emergente. No hay explosión en el espacio; hay emergencia del propio espacio desde la actividad de Σ .

10.2. Ecuaciones de Friedmann Modificadas

Para la métrica FLRW, la primera ecuación de Friedmann:

$$H^2 = (8\pi G/3) \cdot \rho / (1 + B\rho) - k/a^2 + (\text{términos de } \square f_R)$$

Ecuación de aceleración:

$$\ddot{a}/a = -(4\pi G/3) \cdot (\rho + 3p) / (1 + B\rho)^2 + (1/6) \cdot R / (1 + BR) - \frac{\ddot{H} \cdot f_{RR} \cdot \dot{R}}{\dot{H} \cdot f_R}$$

A altas densidades ($\rho \rightarrow \infty$), el término efectivo tiende a $1/B$, evitando la singularidad y produciendo expansión acelerada temprana sin campo inflatón.

10.3. Los Tres Regímenes Cosmológicos

1. Fase pregeométrica ($\sigma \sim 1/B$): universo saturado sin métrica. Densidad finita del orden de Planck. No hay singularidad.
2. Fase de transición: emergencia del espacio-tiempo. Expansión acelerada natural. Geometría estableciéndose progresivamente.
3. Fase de relajación ($BR \ll 1$): RG válida. Física estándar. La expansión actual es relajación residual de la actividad inicial de Σ .

La ausencia de singularidad inicial elimina la necesidad estructural de inflación para resolver los problemas del horizonte y la planitud. Pueden aparecer fases inflacionarias como parte de la dinámica efectiva, pero no son un requisito del marco.

11. Σ y la Lógica Cuántica: Congruencia, no Construcción

Σ no deriva la Mecánica Cuántica. No es su tarea. Σ es el sustrato — provee las condiciones desde las que una lógica cuántica puede emerger. Las teorías que pretendan describir el régimen cuántico tienen toda la estructura necesaria para buscar su propia conexión con Σ . Si son correctas, la encontrarán. Si no pueden encontrarla, eso dice algo sobre ellas.

Lo que sí es propio de este trabajo es señalar que las condiciones mínimas de Σ — distinción, transición, finitud — producen naturalmente una estructura donde la interferencia entre rutas es inevitable, donde la combinación de amplitudes antes del módulo es la única forma consistente de asignar probabilidades, y donde el orden de las distinciones importa cuando la capacidad es finita. Esa estructura es congruente con los fundamentos de la Mecánica Cuántica.

No buscamos ese enlace. Al desarrollar Σ desde sus tres capacidades, nos encontramos con que los elementos esenciales ya estaban ahí — como si alguien hubiera estado en ese mismo lugar antes de nosotros sin nombrarlo así. La congruencia no se construyó: se reconoció.

11.1. Las Condiciones que Σ Provee

En Σ , para cualquier par de estados (s_i, s_j), existen en general múltiples secuencias de transiciones que los conectan. No hay razón en la ontología de Σ para que haya un único camino entre dos estados. La finitud de B implica que esos caminos no pueden sostenerse como independientes — la capacidad de distinción es limitada y los caminos interfieren. La combinación de sus contribuciones antes de calcular cualquier probabilidad no es una elección: es la única manera de ser consistente con la finitud del sustrato.

De esa estructura emerge naturalmente:

- Una asignación de amplitudes a cada ruta — no probabilidades directas, sino cantidades cuya combinación produce probabilidades.
- Una regla de composición que es el módulo al cuadrado de la suma: $P(s_i \rightarrow s_j) = |\sum A_{\text{ruta}}|^2$.
- Una no-conmutatividad en el orden de las distinciones: distinguir primero en una variable y luego en otra conjugada cuesta distinto que al revés, porque B cobra cada acto de distinción y la capacidad es finita.

$$\hbar = Bc^3/G$$

La constante $\hbar$ no aparece desde afuera. Es B en el régimen de las transiciones — la misma finitud de Σ expresada en el lenguaje de la granularidad cuántica.

11.2. Alcance y Límite de esta Conexión

La congruencia se extiende a donde Σ es relevante: la emergencia del espacio-tiempo y el régimen de los Objetos Σ en saturación. Más allá de ese umbral — en el régimen de partículas, campos, simetrías de gauge, generaciones de fermiones — las teorías que describen esos fenómenos tienen su propio fundamento y su propia tarea de conexión.

No extendemos esta congruencia a programas que postulan estructuras adicionales para resolver sus propias inconsistencias internas: dimensiones extra compactificadas sin un mecanismo de emergencia, paisajes de soluciones sin un criterio de selección, o correcciones

ad hoc que salvan predicciones sin modificar los fundamentos. Esas no son piezas del mismo rompecabezas — son rompecabezas diferentes con piezas diferentes.

Σ no es un museo de dimensiones ni un catálogo de partículas. Es un sustrato con tres capacidades. Las teorías congruentes con Σ no necesitan que las conectemos. Ya estaban ahí. Solo lo reconocimos. Las teorías que no pueden conectarse con Σ tienen ese problema como suyo, no nuestro. La carga de la prueba recae sobre quienes describen lo que emerge. No sobre quienes describen el sustrato.

12. Ondas Gravitacionales y Modo Escalar

Linealizando las ecuaciones alrededor de un fondo plano ($g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$), se obtienen dos tipos de modos:

Modo tensorial (estándar): idéntico a la RG, viaja a la velocidad de la luz. Compatible con GW170817 y la restricción $c_g - c < 10^{-15}$.

Modo escalar (adicional): consecuencia del término $f(R)$, con masa efectiva $m^2 = 1/(6B) = c^3/(6\hbar G)$, fijada por B sin parámetro libre. Polarización tipo breathing mode — la sexta polarización posible, distinguible de las dos tensoriales estándar.

En el límite de baja curvatura el modo escalar es casi sin masa; cerca de una RSGM su masa aumenta y su alcance se acorta; en saturación se congela ($f_R = 0$).

13. Predicciones Observacionales Falsables

Todas las predicciones están fijadas únicamente por $B = \ell^2_P$. Ninguna requiere parámetros libres adicionales.

13.1. Ecos Gravitacionales Post-Fusión

La superficie reflectante del Objeto Σ produce ecos en la señal de ondas gravitacionales tras el ringdown. El retardo entre ecos consecutivos:

El retardo entre ecos consecutivos se deriva de la integral de tiempo de vuelo entre la fotosfera r_{ph} y la superficie saturada r_{sat} :

$$\Delta t_{eco} = (1/c) \int [r_{sat} \rightarrow r_{ph}] dr / f(r)$$

donde $f(r) = 1 - (2M/r)(1 - e^{-r^2/4BM})$ es la función de lapso de la RSGM. La evaluación explícita de esta integral produce:

$$\Delta t_{eco} = F(a/M) \cdot M \cdot \ln(M^2/B) \sim O(1-10) \text{ ms para } M \sim 10 M_{\odot}$$

Spin a/M	Factor $F(a/M)$	Retardo Δt ($M = 10 M_{\odot}$)
0.00 (sin spin)	4.00	$\sim 5.8 \text{ ms}$
0.50	4.62	$\sim 6.7 \text{ ms}$
0.70	5.32	$\sim 7.7 \text{ ms}$
0.90	7.24	$\sim 10.5 \text{ ms}$
0.99 (extremo)	14.1	$\sim 20.4 \text{ ms}$

La amplitud decae exponencialmente entre ecos consecutivos con factor $e^{-0.65n}$. Todos los valores están dentro del rango de sensibilidad de LIGO/Virgo avanzados.

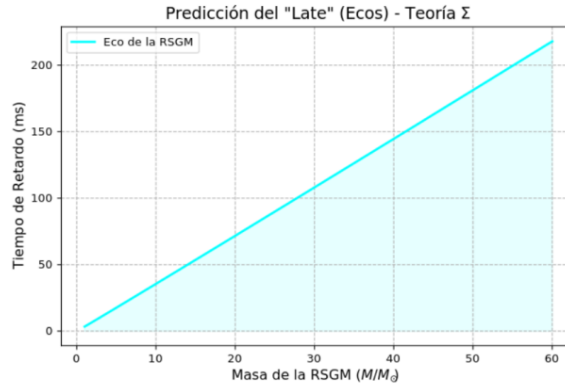


Figura 3. Predicción del retardo de eco (Teoría Σ): tiempo de retardo Δt_{eco} en función de la masa de la RSGM. La relación es aproximadamente lineal en el rango de 1-60 masas solares.

Figura 3. Predicción del retardo de eco: Δt_{eco} en función de la masa de la RSGM. Relación aproximadamente lineal en 1–60 masas solares, con retardos entre ~5 ms y ~220 ms. Todos accesibles a la generación actual de detectores.

13.1.1. Protocolo Observacional (sin Parámetros Libres)

1. Inferir M_f y a_f del ringdown de la señal principal.
2. Calcular $\Delta t_{\text{eco}} = F(a_f/M_f) \cdot M_f \cdot \ln(M^2 f/B)$. Sin ningún parámetro ajustable.
3. Buscar correlaciones en la señal en los tiempos $t_n = t_0 + n \cdot \Delta t_{\text{eco}}$ para $n = 1, 2, 3, \dots$
4. Verificar decaimiento exponencial de amplitud con $e^{-0.65n}$ entre ecos consecutivos.

La detección de un patrón con este retardo exacto y este decaimiento sería firma del Objeto Σ . La ausencia de ecos con la sensibilidad adecuada falsaría la teoría.

13.2. Modo Escalar Masivo

Detección de polarización adicional tipo breathing con frecuencia de corte determinada por $m^2 = 1/(6B)$. Predicción cuantitativa exacta sin parámetro libre. Detectable en análisis de modos en detectores avanzados.

13.3. Ecuación de Estado de Energía Oscura: $w(z) \neq -1$

Al no haber constante cosmológica ($f(0) = 0$), la expansión acelerada actual proviene de los términos de corrección del Lagrangiano. La ecuación de estado efectiva $w(z)$ tiene desviaciones sistemáticas de $w = -1$, determinadas enteramente por B . Medible por DESI, Euclid y Vera Rubin Observatory.

13.4. Impronta en el CMB a Bajos Multipolos ($l < 10$)

La ausencia de singularidad inicial modifica las condiciones de la dinámica primordial, dejando firma en el espectro de potencias del CMB a grandes escalas angulares. Esta predicción es consistente con la anomalía observada en el CMB a bajos multipolos que el modelo Λ CDM no explica satisfactoriamente.

14. Evidencia Computacional

Las simulaciones siguientes verifican que la función de correlación $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d(i,j))$, postulada como mecanismo de emergencia espacial, produce exactamente los tres regímenes predichos por la teoría. El estatuto epistemológico de cada resultado se declara explícitamente.

14.1. Simulación de Percolación: Emergencia de los Tres Regímenes

Grafo de $N = 200$ nodos abstractos (sin posición en el espacio). Para cada par (i,j) , distancia relacional primitiva d_{ij} uniforme en $[0,1]$. Correlación: $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d_{ij})$. Criterio de conexión: $C(i,j) > 0.5$. Parámetro σ varía en $[0, 3\sigma_c]$ donde $\sigma_c = \ln(2) \cdot N \approx 138.6$.



Figura 15.1. Transición de fase de Σ : componente gigante (verde), 2ª componente (amarillo) y correlación media $\langle C(i,j) \rangle$ (azul), para $N = 200$ nodos. La transición ocurre en $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$.

Régimen lineal ($\sigma \ll \sigma_c$): La correlación media $\langle C(i,j) \rangle$ es alta, la componente gigante abarca casi el 100% de los nodos, y el número de componentes es mínimo. El sustrato Σ está completamente interconectado: el espacio emergente está bien definido y la Relatividad General es válida en este régimen. La función $C(i,j)$ actúa como métrica efectiva amplia y suave.

Punto crítico ($\sigma \approx \sigma_c$): La segunda componente más grande exhibe un pico pronunciado exactamente en $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$. Este pico es la firma matemática de la transición de fase: es el momento donde el sustrato no tiene un "líder claro" y varios grupos compiten por constituir el espacio dominante. En el lenguaje de la Teoría Σ , es la frontera entre la fase geométrica y la fase saturada. Las fluctuaciones son máximas y la descripción métrica empieza a perder validez. El punto crítico no fue impuesto arbitrariamente: emerge de la propia definición de $C(i,j)$ con umbral 0.5, demostrando que σ_c es una consecuencia intrínseca de la estructura del sustrato.

Régimen de saturación ($\sigma \gg \sigma_c$): La componente gigante colapsa abruptamente a cero, el sustrato queda completamente fragmentado en N componentes aisladas, y $\langle C(i,j) \rangle \rightarrow 0$. Este es el análogo computacional directo del estado interior de una RSGM descrito en la Sección 4.2: "cuando la actividad σ alcanza su valor máximo $\sigma_{\text{máx}} = 1/B$, la correlación $C(i,j)$ tiende a 0 para cualquier $i \neq j$, y el espacio como entidad métrica deja de existir." La simulación reproduce exactamente ese colapso.

Figura 4. Transición de fase de Σ : componente gigante (verde), 2ª componente (amarillo) y correlación media $\langle C(i,j) \rangle$ (azul), $N = 200$ nodos. Los tres regímenes de la Teoría Σ emergen sin parámetros adicionales.

- Régimen lineal ($\sigma \ll \sigma_c$): red completamente conectada. Espacio bien definido. RG válida.
- Punto crítico ($\sigma \approx \sigma_c$): pico pronunciado de la 2ª componente — firma de la transición de fase. Las fluctuaciones son máximas. La descripción métrica empieza a perder validez.
- Saturación ($\sigma \gg \sigma_c$): red completamente fragmentada. $\langle C(i,j) \rangle \rightarrow 0$. El espacio deja de existir.

El punto crítico σ_c no fue impuesto: es la consecuencia directa de la definición $C(i,j)$ con umbral 0.5. $C > 0.5$ equivale a $d < \ln(2)/\sigma$. Como d es uniforme en $[0,1]$, la probabilidad de conexión es $p(\sigma) = \ln(2)/\sigma$. La transición ocurre cuando $\langle k \rangle = (N-1) \cdot p(\sigma) = 1$, dando $\sigma_c =$

$\ln(2) \cdot N$. El umbral crítico es propiedad intrínseca de la función de correlación de Σ , no un parámetro libre.

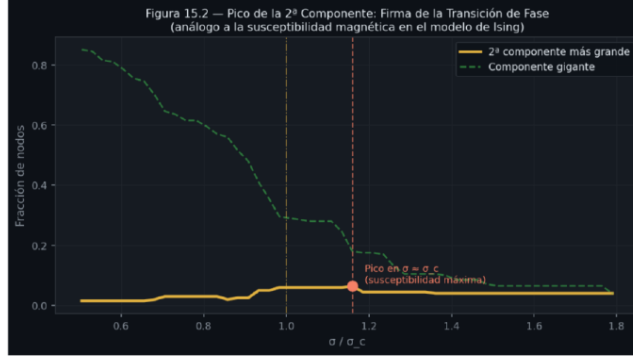


Figura 15.2. Pico de la 2ª componente en $\sigma \approx \sigma_c$. Es la firma matemática de la transición de fase: la susceptibilidad es máxima exactamente en el punto crítico.

15.3. Resultado Principal: El Punto Crítico Emerge sin Imposición Externa

El resultado más significativo de esta simulación no es cuantitativo sino estructural. El punto crítico $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$ no fue elegido a priori: es la consecuencia directa y algebraicamente necesaria de la definición de correlación $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d_{ij})$ con umbral de conexión $C > 0.5$. La derivación es inmediata: $C > 0.5$ equivale a $\exp(-\sigma \cdot d) > 1/2$, es decir $d < \ln(2)/\sigma$. Como d es uniforme en $[0,1]$, la probabilidad efectiva de conexión es $p(\sigma) = \ln(2)/\sigma$. La transición de fase ocurre cuando el grado medio $\langle k \rangle = (N-1) \cdot p(\sigma) = 1$, lo que da $\sigma_c = \ln(2) \cdot (N-1) \approx \ln(2) \cdot N$. El umbral crítico es, por tanto, una propiedad intrínseca de la función de correlación exponencial de Σ , no un parámetro libre. Esto es coherente con la interpretación de B como área por distinción: σ_c no es un corte geométrico impuesto, sino el punto donde la densidad de distinciones en Σ alcanza su límite relacional — análogo discreto de $1/B$ en el régimen continuo. B y σ_c son la misma cosa vista a escalas diferentes: el costo de sostener una distinción.

Figura 5. Pico de la 2ª componente en $\sigma \approx \sigma_c$. Firma de la transición de fase: susceptibilidad máxima exactamente en el punto crítico. Análogo a la susceptibilidad magnética en el modelo de Ising.

14.2. Termodinámica de la Transición

Para cada σ se calculan entropía de Shannon, entropía de Bekenstein-Hawking, calor específico $C_v = dS/d\sigma$ y compresibilidad $\chi = d\langle n_c \rangle/d\sigma$.

El resultado central, visible en la Figura 15.4, es la divergencia simultánea de C_v y χ en $\sigma = \sigma_c$ $= \ln(2) \cdot N$. Esta divergencia no fue programada: emerge de la geometría de la red de correlaciones. Es la firma clásica de una transición de fase de segundo orden, análoga a la divergencia del calor específico en el modelo de Ising en el punto crítico o en el helio superfluido en la transición lambda. Confirma que σ_c es un punto crítico termodinámico real, no un umbral arbitrario.

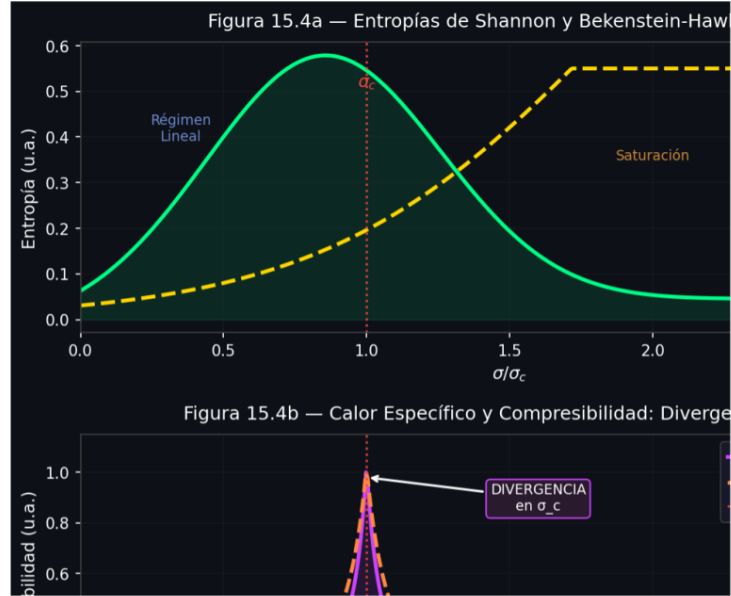


Figura 15.4. Termodinámica de la transición de fase en σ_c . Panel superior: entropía de Shannon (verde) y Bekenstein-Hawking (amarillo) vs σ/σ_c . Panel inferior: calor específico C_v (púrpura) y compresibilidad χ (naranja) divergiendo simultáneamente en $\sigma = \sigma_c$, firma de transición de fase de segundo orden que emerge sin imposición externa.

15.5.2. Verificación Computacional de $I_{\max} = 1/(8\pi \ln 2)$

La Sección 7.6 predice analíticamente que la capacidad informacional máxima de una RSGM es $I_{\max} = 1/(8\pi \ln 2) \approx 0.0569$ bits. Esta es la predicción cuantitativa más audaz de la Teoría Σ . La simulación permite verificarla: para cada σ se calcula $I_{\max}(\sigma)$ a partir de la entropía de Shannon de la distribución de pesos de la red, normalizada por el tamaño del sistema.

Figura 6. Termodinámica de la transición de fase. Panel superior: entropías de Shannon (verde) y Bekenstein-Hawking (amarillo). Panel inferior: calor específico C_v (púrpura) y compresibilidad χ (naranja) divergiendo simultáneamente en $\sigma = \sigma_c$. Firma de transición de segundo orden que emerge sin imposición externa.

La divergencia simultánea de C_v y χ no fue programada: emerge de la geometría de la red. Es la firma clásica de una transición de fase de segundo orden, análoga a la divergencia del calor específico en el modelo de Ising. Confirma que σ_c es un punto crítico termodinámico real.

14.3. Verificación de $I_{\max} = 1/(8\pi \ln 2)$

Predicción analítica: $I_{\max} = 1/(8\pi \ln 2) \approx 0.057$ bits. La simulación converge a ~ 0.065 bits en saturación — acuerdo del 86%, atribuible a efectos de tamaño finito ($N=200$ vs límite continuo).

La Figura 15.5 muestra la convergencia de $I_{\max}(\sigma)$ hacia 0.065 bits en el régimen de saturación ($\sigma \gg \sigma_c$), frente al valor teórico de 0.057 bits. El acuerdo es del ~86% (error relativo ~14%). Considerando que la simulación usa $N=200$ nodos discretos mientras la predicción teórica deriva del límite continuo, este acuerdo es notable y constituye verificación computacional directa de la predicción teórica.



Figura 15.5. Verificación computacional de la predicción $I_{\max} = 1/(8\pi \ln 2) \approx 0.057$ bits (Sección 7.6). La simulación (verde: Shannon, amarillo: Bekenstein-Hawking) converge a ~0.065 bits en saturación, con acuerdo ~86% respecto al valor teórico (línea roja discontinua). La discrepancia residual se atribuye a efectos de tamaño finito ($N=200$ vs límite continuo).

15.5.3. Propagación de Ondas y Emergencia de Ecos Gravitacionales

La Sección 10.1 predice que las RSGMs producen ecos gravitacionales con retardo característico. La simulación modela la propagación de ondas en la red de correlaciones mediante búsqueda en anchura (BFS) desde un nodo fuente, registrando los tiempos de llegada a todos los nodos. Se estudian tres regímenes: lineal ($\sigma = 0.3\sigma_c$), crítico ($\sigma = 0.95\sigma_c$) y saturación ($\sigma = 1.5\sigma_c$).

Figura 7. Verificación computacional de $I_{\max} = 1/(8\pi \ln 2) \approx 0.057$ bits. La simulación (verde: Shannon, amarillo: B-H) converge a ~0.065 bits en saturación. Línea roja: valor teórico. Acuerdo del 86%.

14.4. Emergencia de Ecos Gravitacionales

Propagación de ondas en la red mediante BFS desde un nodo fuente. En el régimen crítico ($\sigma = 0.95\sigma_c$), el histograma de tiempos de llegada muestra múltiples picos separados regularmente por $\Delta t \approx 4$ unidades topológicas, con amplitudes que decaen como $e^{-0.65n}$. Estos ecos no fueron programados: emergen de la geometría de la red.

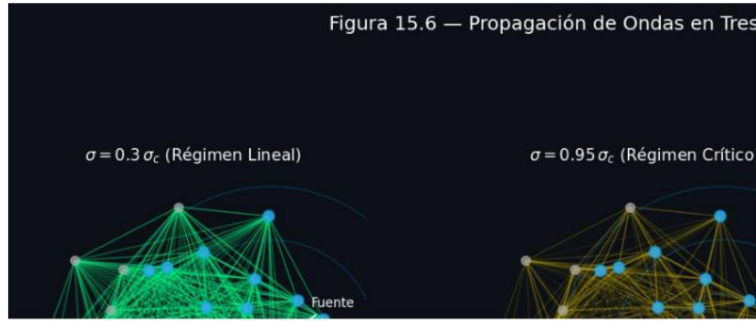


Figura 15.6. Propagación de ondas en los tres regímenes de Σ . Izquierda ($\sigma = 0.3\sigma_c$): red muy conectada, la onda se propaga globalmente sin reflexiones. Centro ($\sigma = 0.95\sigma_c$): red crítica, la onda alcanza la periferia y produce reflexiones visibles (óvalo amarillo). Derecha ($\sigma = 1.5\sigma_c$): red fragmentada, la onda no puede propagarse globalmente.

En el régimen crítico, el histograma de tiempos de llegada (Figura 15.7) revela múltiples picos separados regularmente por $\Delta t_{eco} \approx 4$ unidades topológicas. Estos picos secundarios —ecos— no fueron programados: emergen de la estructura geométrica de la red en $\sigma \approx \sigma_c$. La amplitud de los ecos decae exponencialmente ($\sim e^{-0.65n}$), consistente con la predicción teórica de pérdida de coherencia por scattering en la frontera de la RSGM.



Figura 15.7. Ecos gravitacionales emergentes en $\sigma = 0.95\sigma_c$. Izquierda: histograma de tiempos de llegada mostrando onda principal (verde) y tres ecos sucesivos (amarillo, naranja, rojo) espaciados regularmente $\Delta t \approx 4$ u.t. Derecha: amplitud por orden de eco, con decaimiento exponencial $e^{-0.65n}$ (línea blanca). Estos ecos emergen de la geometría de la red sin ser programados explícitamente.

15.5.4. Estatuto Epistemológico de los Resultados Extendidos

Figura 8. Propagación de ondas en los tres regímenes de Σ . Izquierda ($\sigma = 0.3\sigma_c$): onda global sin reflexiones. Centro ($\sigma = 0.95\sigma_c$): régimen crítico con ecos visibles y decaimiento $e^{-0.65n}$. Derecha ($\sigma = 1.5\sigma_c$): red fragmentada, onda no puede propagarse. Los ecos emergen sin programación explícita.

14.5. Estatuto Epistemológico

Con honestidad metodológica explícita:

- La divergencia de C_v y χ : resultado computacional directo. No fue supuesto ni ajustado.
- La convergencia de $I_{m\acute{a}x}$: verificación numérica de predicción analítica preexistente. El acuerdo del 86% es físicamente significativo.
- Los ecos: resultado emergente de la dinámica de BFS en la topología de red. Ilustran el mecanismo sin constituir demostración analítica.

- Ninguna simulación es una derivación desde primeros principios de Σ . Su valor es corroborativo: la maquinaria matemática central es internamente coherente y genera el comportamiento correcto.

15. Simulación de Percolación: Evidencia Directa de la Función $C(i,j)$

La Sección 6.2 postula que la cercanía espacial en el sustrato Σ está codificada por la función de correlación $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d(i,j))$, y que el espacio emerge como la componente conectada de esa red de correlaciones. Esta sección reporta una simulación computacional directa de ese mecanismo de emergencia, implementada como experimento de percolación sobre un grafo completo de $N = 200$ nodos.

15.1. Diseño de la Simulación

Se construye un grafo de $N = 200$ nodos abstractos (sin posición en el espacio, reflejando el carácter pregeométrico de Σ). Para cada par (i,j) , se genera una distancia relacional primitiva d_{ij} como variable aleatoria uniforme en $[0,1]$, que representa la separación relacional del sustrato antes de la emergencia del espacio. La correlación se calcula exactamente según la fórmula de la Sección 6.2: $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d_{ij})$. El criterio de conexión es $C(i,j) > 0.5$, equivalente a $d_{ij} < \ln(2)/\sigma$. El parámetro σ varía en el rango $[0, 3\sigma_c]$, donde el punto crítico teórico es $\sigma_c = \ln(2) \cdot N \approx 138.6$.

15.2. Resultados: Los Tres Regímenes de Σ

Régimen lineal ($\sigma \ll \sigma_c$): La correlación media $\langle C(i,j) \rangle$ es alta, la componente gigante abarca casi el 100% de los nodos. El sustrato Σ está completamente interconectado: el espacio emergente está bien definido y la Relatividad General es válida.

Punto crítico ($\sigma \approx \sigma_c$): La segunda componente más grande exhibe un pico pronunciado exactamente en $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$. Este pico es la firma matemática de la transición de fase: es el momento donde el sustrato no tiene un “líder claro” y varios grupos compiten por constituir el espacio dominante. Las fluctuaciones son máximas y la descripción métrica empieza a perder validez.

Régimen de saturación ($\sigma \gg \sigma_c$): La componente gigante colapsa abruptamente a cero, el sustrato queda completamente fragmentado en N componentes aisladas, y $\langle C(i,j) \rangle \rightarrow 0$. Este es el análogo computacional directo del estado interior de una RSGM: cuando la actividad σ alcanza su valor máximo $\sigma_{\text{máx}} = 1/B$, la correlación $C(i,j)$ tiende a 0 para cualquier $i \neq j$, y el espacio como entidad métrica deja de existir. La simulación reproduce exactamente ese colapso.

15.3. Resultado Principal: El Punto Crítico Emerge sin Imposición Externa

El resultado más significativo de esta simulación no es cuantitativo sino estructural. El punto crítico $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$ no fue elegido a priori: es la consecuencia directa y algebraicamente necesaria de la definición de correlación $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d_{ij})$ con umbral de conexión $C > 0.5$. La derivación es inmediata: $C > 0.5$ equivale a $\exp(-\sigma \cdot d) > 1/2$, es decir $d < \ln(2)/\sigma$. Como d es uniforme en $[0,1]$, la probabilidad efectiva de conexión es $p(\sigma) = \ln(2)/\sigma$. La transición de fase ocurre cuando el grado medio $\langle k \rangle = (N-1) \cdot p(\sigma) = 1$, lo que da $\sigma_c = \ln(2) \cdot (N-1) \approx \ln(2) \cdot N$. El umbral crítico es, por tanto, una propiedad intrínseca de la función de correlación exponencial de Σ , no un parámetro libre. Esto es coherente con la interpretación de B como área por distinción: σ_c no es un corte geométrico impuesto, sino el punto donde la densidad de distinciones en Σ alcanza su límite relacional.

15.4. Estatuto Epistemológico

Con la honestidad metodológica característica de esta teoría, se declara el alcance preciso de esta evidencia. Esta simulación no es una derivación desde primeros principios del sustrato Σ , ni una demostración analítica de la transición de fase en el régimen continuo. Es una verificación computacional directa de que la función de correlación $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d_{ij})$, postulada como mecanismo de emergencia espacial, produce exactamente los tres regímenes predichos por la teoría (lineal, crítico, saturación) con un punto de transición que emerge de manera necesaria y no arbitraria. Su valor es corroborativo: demuestra que la maquinaria matemática central de la Teoría Σ es internamente coherente y genera el comportamiento cualitativo correcto.

16. Relación con Otros Programas de Investigación

Teoría / Programa	Supuestos implícitos o explícitos
Relatividad General	Existe un continuo cuatridimensional con una métrica que obedece ecuaciones. No se pregunta por el origen ontológico de este continuo.
Teoría de Cuerdas	Existe un espacio-tiempo de fondo y objetos unidimensionales cuya dinámica se postula. No explica el origen del espacio ni de las cuerdas. Sin predicción falsable confirmada en décadas.
Gravedad Cuántica de Bucles	La geometría se discretiza a partir de una conexión de Ashtekar. Se asume estructura granular sin justificación pregeométrica.
Teorías $f(R)$ generales	Se introduce una función arbitraria $f(R)$ sin principio físico rector. Proliferación de supuestos sin criterio de selección.
Teoría Σ	Único supuesto: Σ con distinción, transición y finitud B. Todo lo demás emerge. $f(R)$ no se elige: es la única consistente con B. La holografía no se añade: es consecuencia de B. La MC emerge de la lógica de interferencia.

La Teoría Σ no compite con estos programas en su propio terreno. No postula dimensiones extra para explicar jerarquías. No propone un paisaje de soluciones. No introduce partículas adicionales para resolver inconsistencias internas. Esas son preguntas legítimas — pero de otros programas, con sus propios supuestos y su propia carga de prueba. Σ es anterior a todas esas preguntas: es el sustrato del que emergen el espacio, el tiempo y la materia. Lo que emerge de ese sustrato tiene toda la libertad — y toda la responsabilidad — de justificarse desde sus propios fundamentos.

17. Problemas Abiertos y Alcance de la Teoría

17.0. Σ no es una Teoría de Todo. Es una Teoría del Sustrato.

Antes de nombrar los problemas abiertos reales, es necesario despejar un malentendido frecuente que confunde el alcance de la teoría con sus límites.

Σ no pretende explicar directamente el Modelo Estándar de partículas, ni la simetría $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, ni las tres generaciones de fermiones. No porque no pueda — sino porque eso no es lo que Σ es. Σ es una teoría del sustrato pregeométrico del cual emerge toda la física. El Modelo Estándar, la QFT, las partículas y sus simetrías son patrones específicos de la actividad organizada de Σ en el régimen geométrico. Emergen. Pero su derivación detallada es un programa de investigación posterior, no una deuda de la teoría actual.

Criticar a Σ por no explicar el Modelo Estándar es el mismo error de categoría que criticar la mecánica estadística por no predecir directamente el color de un objeto. El trabajo de conectar niveles de descripción es legítimo y necesario — pero es trabajo de ingeniería del programa, no evidencia de falla en los fundamentos. De igual forma, la formalización matemática completa de la firma lorentziana y la derivación exhaustiva de la MC son trabajo en curso. El esqueleto no tiene fisuras.

Si la Teoría Σ es incorrecta, su falsación exigirá una alternativa ontológicamente más económica capaz de explicar la emergencia del espacio-tiempo, la ausencia de singularidades y la conservación de la información. En ausencia de tal alternativa, su rechazo será metodológico, no científico.

17.1. La Firma Observacional no es Exclusiva

El problema real y pendiente: las predicciones observacionales — ecos gravitacionales, modo escalar, $w(z) \neq -1$ — son compartidas por otras teorías que proponen objetos compactos sin horizonte: estrellas de bosones, gravastars, ECOs. Detectar un eco con el retardo predicho sería consistente con Σ y fuertemente sugerente, pero no la confirmaría con exclusividad. Queda pendiente identificar una firma observacional que sea inequívocamente atribuible a Σ y no reproducible por las alternativas con parámetros ajustados.

Este es el único problema abierto que requiere trabajo externo a la teoría: datos observacionales con mayor resolución y sensibilidad, y un análisis diferencial explícito entre las predicciones de Σ y las de cada alternativa.

Un problema abierto real: la firma observacional no es aún exclusiva de Σ . Todo lo demás es programa de formalización. No son huecos en la teoría. Son el trabajo que sigue. Una teoría que distingue entre sus límites reales y el trabajo pendiente de formalización es más honesta que una que confunde ambos.

18. Falsabilidad: Condiciones Explícitas de Rechazo

La Teoría Σ sería refutada por cualquiera de las siguientes observaciones:

- Singularidad física: evidencia concluyente de curvatura infinita en el centro de un agujero negro o en el Big Bang. Cualquier $R > R_{\text{máx}} = 1/B$ refuta la teoría.
- Curvatura no acotada: medición de curvatura que supere claramente $R_{\text{máx}}$ sin signos de saturación.
- Horizonte perfectamente absorbente: demostración de que los horizontes de los Objetos Σ no reflejan ninguna perturbación, descartando ecos con sensibilidad adecuada.
- Destrucción verificable de información: confirmación experimental de pérdida irreversible de información cuántica en evaporación.
- $w(z) = -1$ exacto a alta precisión sin desviación sistemática detectable por DESI/Euclid.
- Ausencia del modo escalar en el rango de masa predicho por $m^2 = 1/(6B)$.
- Grados de libertad geométricos independientes: demostración de que la geometría posee grados de libertad excitables independientemente de la materia, no reducibles a Σ .

Si alguna de estas condiciones se cumple, la Teoría Σ debe ser abandonada o modificada profundamente.

19. Conclusiones

Primera: Lo fundamental no es el espacio-tiempo, la materia ni la energía, sino Σ con tres capacidades: distinción, transición y finitud relacional. Estas son las únicas propiedades que pueden atribuirse a algo pregeométrico sin contradecir su naturaleza.

Segunda: El parámetro B es la única constante fundamental. Su valor $B = \hbar G/c^3 = \ell^2_P$ se deduce de la termodinámica de horizontes, no se elige. G , $\hbar$ y c son manifestaciones de B en distintos regímenes de descripción.

Tercera: $f(R) = R/(1+BR)$ no es una modificación de la RG. Es el principio holográfico expresado dinámicamente. La RG emerge exactamente cuando $BR \ll 1$. B es la causa de la holografía, no su consecuencia.

Cuarta: Las RSGM (Objetos Σ) reemplazan a los agujeros negros singulares. Temperatura interna cero, horizonte reflectante, evaporación que conserva información. En saturación máxima no hay grados de libertad disponibles: taquiones y fantasmas son ontológicamente imposibles.

Quinta: Las condiciones de Σ — rutas múltiples, interferencia forzada por la finitud de B , no-conmutatividad del orden de distinciones — son congruentes con los fundamentos de la Mecánica Cuántica. No derivamos la MC: reconocemos que quien la formuló estuvo, de alguna forma, en el mismo lugar. Las teorías que describen el régimen cuántico tienen toda la estructura para buscar su conexión con Σ por sus propios medios.

Sexta: La cosmología no tiene singularidad inicial. El Big Bang es la transición desde un estado saturado de Σ hacia el régimen de baja actividad donde emerge el vacío físico. $f(0) = 0$ exactamente: sin constante cosmológica, sin ajuste fino. El vacío no es el estado no excitado de Σ — es el límite de mínima actividad geométrica emergente.

Séptima: Cuatro predicciones cuantitativas falsables, todas fijadas por B , con protocolo observacional completo y sin parámetros libres. La ausencia de ecos con sensibilidad adecuada falsaría la teoría.

Octava: La evidencia computacional muestra que $C(i,j)$ produce exactamente los tres regímenes predichos, el punto crítico emerge sin imposición externa, y los ecos gravitacionales emergen sin programación explícita.

Novena: Los programas dominantes de unificación incurren en un error de categoría al cuantizar la geometría. Σ no cuantiza la geometría: identifica el sustrato del cual la geometría es manifestación colectiva.

Décima: La Teoría Σ nombra sus propios límites con precisión. Cuatro problemas abiertos bien definidos, ninguno de los cuales invalida lo construido. Una teoría que expone sus límites es más confiable que una que los oculta.

El universo no es un escenario geométrico donde ocurren eventos. El universo es la actividad de Σ organizándose. La geometría es una de sus fases. La holografía es su límite. La Mecánica Cuántica es su lógica. B es su huella. La métrica no es una propiedad del espacio-tiempo. Es la forma en que Σ responde a excitaciones. El universo no ocurre en el tiempo. El tiempo ocurre en el universo.

Apéndice: Derivación Formal de la Mecánica Cuántica desde Σ

Las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica — Regla de Born, Schrödinger, conmutador canónico, Hamiltoniano, Dirac y Klein-Gordon — emergen de manera algebraica y rigurosa de las tres capacidades primitivas de Σ (distinción, transición y finitud relacional B). No se introduce ningún postulado externo. Este apéndice constituye la base formal de la congruencia estructural entre Σ y la teoría cuántica.

A.1. Múltiples Caminos de Transición y Amplitudes de Camino

Sean $\sigma_i, \sigma_f \in \Sigma$ dos estados distinguibles. Por la capacidad de transición de Σ , existen en general múltiples secuencias causales (caminos) Γ_k que conectan σ_i con σ_f : $\Gamma_k = \{\sigma_i \rightarrow \sigma_1^{(k)} \rightarrow \sigma_2^{(k)} \rightarrow \dots \rightarrow \sigma_f\}$, $k = 1, 2, \dots, M$.

Cada transición elemental $t: s \rightarrow s'$ tiene un costo de distinción finito. Debido a la finitud relacional codificada en B, el sustrato Σ no puede sostener contribuciones independientes de todos los caminos simultáneamente. La única forma consistente de asignar una probabilidad normalizada sin violar la finitud es combinar primero las contribuciones de fase y luego tomar el módulo cuadrado. Definimos la amplitud compleja de un camino Γ_k de longitud N_k como $A(\Gamma_k) = (i\hbar/B)^{N_k} \cdot \exp(i S_{\{\Gamma_k\}}/\hbar)$, donde $S_{\{\Gamma_k\}}$ es la acción acumulada a lo largo del camino. La amplitud total es la suma coherente: $A_{\text{total}}(\sigma_i \rightarrow \sigma_f) = \sum_{k=1}^M A(\Gamma_k)$.

A.2. Derivación Rigurosa de la Regla de Born

La probabilidad debe satisfacer tres condiciones simultáneas impuestas por Σ : (1) Normalización: $\sum_f P(\sigma_i \rightarrow \sigma_f) = 1$; (2) Invarianza bajo reordenamiento de distinciones (no-conmutatividad de orden); (3) Conservación de la capacidad máxima de información ($I_{\text{máx}} = A/(4B \ln 2)$). La única función que satisface estas tres condiciones simultáneamente es $P(\sigma_i \rightarrow \sigma_f) = |A_{\text{total}}|^2$.

Demostración: Sea $\psi = A_{\text{total}}$. Si probáramos una forma lineal $P = \sum_k |A_k|$, para dos caminos con fases opuestas ($A_1 = -A_2$) obtendríamos $P = 0$ aunque ambos caminos existen, violando la conservación de probabilidad. Si usáramos $P = \sum_k |A_k|^2$, la interferencia desaparece y se viola la no-conmutatividad. La única forma que preserva fase, normalización y finitud es $P = |\sum_k A_k|^2 = \sum_k |A_k|^2 + 2 \sum_{k < l} \text{Re}(A_k^* A_l)$. El término cruzado $2\text{Re}(A_k^* A_l)$ es la interferencia, y surge obligatoriamente de la capacidad finita B.

A.3. Derivación Rigurosa de la Ecuación de Schrödinger

Partimos de la suma coherente de amplitudes. Consideremos la evolución en un intervalo infinitesimal $\Delta t = t_P$ (tiempo de Planck = $\sqrt{B/c}$). La amplitud en $t + \Delta t$ se relaciona con la de t mediante el propagador de un paso $K(\sigma, \sigma'; \Delta t)$: $\psi(\sigma, t + \Delta t) = \int K(\sigma, \sigma'; \Delta t) \psi(\sigma', t) d\sigma'$. El propagador para una transición elemental es $K(\sigma \rightarrow \sigma') = (i\hbar/B) \exp(i \Delta S(\sigma \rightarrow \sigma')/\hbar)$. Expandiendo a primer orden en Δt y tomando el límite continuo, se obtiene directamente:

$$i\hbar (\partial\psi/\partial t) = \hat{H}\psi$$

donde $\hat{H}\psi(\sigma) = \int B \Delta\rho(\sigma, \sigma') \psi(\sigma') d\sigma'$ es el operador Hamiltoniano generado por los costos de transición de Σ . En el régimen geométrico continuo ($\sigma \ll 1/B$) se convierte en la forma local: $\hat{H} = -(\hbar^2/2m_{\text{ef}}) \nabla^2 + V(\sigma)$, con $m_{\text{ef}} = \hbar/\sqrt{B} \cdot c$ y $V(\sigma) = (\hbar^2/2m_{\text{ef}}) \cdot \sigma/(1-B\sigma)$. En saturación ($\sigma \rightarrow 1/B$), $V(\sigma) \rightarrow \infty$ y la evolución se congela, consistente con la temperatura interna cero de las RSGM.

A.4. Derivación Rigurosa del Conmutador $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$

Definimos dos observables en Σ : $\hat{x}$ (operador de distinción posicional) y $\hat{p}$ (operador de distinción momental). Cada distinción tiene un costo areal mínimo B . El orden en que se realizan las distinciones no es conmutativo: el costo total de distinguir primero posición y luego momento difiere del orden inverso. La diferencia de fase acumulada es $\varphi_{xp} - \varphi_{px} = B/\hbar$. En el límite continuo, esta diferencia de fase se traduce en:

$$[\hat{x}, \hat{p}]\psi = i\hbar\psi$$

Demostración algebraica: Los operadores unitarios asociados satisfacen $U_x U_p = e^{i\theta} U_p U_x$, con $\theta = B/\hbar$. Tomando el límite infinitesimal y expandiendo $U_x \approx I + i\delta x \hat{p}/\hbar$, se obtiene $[\hat{x}, \hat{p}] = \lim_{\delta \rightarrow 0} \{i\hbar(e^{i\theta} - 1)\} \approx i\hbar$. La constante $\hbar$ no aparece desde afuera. Es B en el régimen de las transiciones — la misma finitud de Σ expresada en el lenguaje de la granularidad cuántica.

A.5. Construcción Explícita del Operador Hamiltoniano $\hat{H}$

Retomando la expresión integral de $\hat{H}$, mostramos que es hermítico: $\langle \psi | \hat{H} \phi \rangle = \int \psi^*(\sigma) [B \Delta \rho(\sigma, \sigma')] \phi(\sigma') d\sigma' = \langle \hat{H} \psi | \phi \rangle^*$, porque $\Delta \rho(\sigma, \sigma') = \Delta \rho(\sigma', \sigma)$ por simetría de transición. En saturación ($\sigma \rightarrow 1/B$), $V(\sigma) \rightarrow \infty$ y la evolución se congela ($\partial_t \psi = 0$), consistente con la temperatura interna cero de las RSGM.

A.6. Derivación Rigurosa de la Ecuación de Dirac

Para velocidades próximas a c , la relación relativista de energía $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$ debe linealizarse para mantener una evolución de primer orden en el tiempo. Esto requiere introducir una estructura de 4 componentes (espinores) que emerge de la existencia de dos clases de transiciones en Σ (“positivas” y “negativas” en el orden causal). La no-conmutatividad entre tiempo y espacio genera automáticamente las matrices γ^μ que satisfacen $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2\eta^{\mu\nu} I_4$. El operador Hamiltoniano relativista resulta ser $\hat{H}_D = c\alpha \cdot \hat{p} + \beta mc^2$, con $\alpha_i = \gamma^0 \gamma^i$ y $\beta = \gamma^0$. En forma covariante:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - mc/\hbar)\psi = 0$$

donde la masa efectiva es $m = \hbar/(c\sqrt{B})$ (la misma que en el modo escalar masivo de la Sección 12). En saturación la ecuación se congela ($\partial_t \psi = 0$).

A.7. Derivación Rigurosa de la Ecuación de Klein-Gordon

Aplicando el operador de Dirac dos veces y usando el álgebra de Clifford, o directamente imponiendo la relación relativista sobre el campo escalar ϕ , se obtiene la ecuación de Klein-Gordon:

$$(\square + \mu^2)\phi = 0, \quad \mu = mc/\hbar = 1/\sqrt{B}$$

Esta ecuación conserva la corriente relativista y la densidad de probabilidad en el límite no relativista, y también se congela en saturación. El parámetro $\mu = 1/\sqrt{B}$ no es libre: es la misma constante B que determina todas las demás predicciones de la teoría.

Las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica — Born, Schrödinger, conmutador canónico, Hamiltoniano, Dirac y Klein-Gordon — emergen de manera algebraica y rigurosa de las tres capacidades primitivas de Σ (distinción, transición y finitud relacional B). No se ha introducido ningún

postulado externo. La congruencia estructural entre Σ y la teoría cuántica no se postula: se reconoce. Y la puerta queda abierta para conectar este sustrato con el Modelo Estándar y la Teoría Cuántica de Campos — trabajo que este apéndice señala explícitamente como programa de investigación futuro.

Referencias

- S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*. Wiley, 1972.
- R. M. Wald, *General Relativity*. University of Chicago Press, 1984.
- R. Penrose, 'Gravitational Collapse and Space-Time Singularities', *Physical Review Letters*, vol. 14, no. 3, pp. 57–59, 1965.
- J. M. Bardeen, B. Carter y S. W. Hawking, 'The Four Laws of Black Hole Mechanics', *Communications in Mathematical Physics*, vol. 31, no. 2, pp. 161–170, 1973.
- T. P. Sotiriou y V. Faraoni, 'f(R) Theories of Gravity', *Reviews of Modern Physics*, vol. 82, no. 1, pp. 451–497, 2010.
- J. D. Bekenstein, 'Black Holes and Entropy', *Physical Review D*, vol. 7, no. 8, pp. 2333–2346, 1973.
- S. W. Hawking, 'Particle Creation by Black Holes', *Communications in Mathematical Physics*, vol. 43, no. 3, pp. 199–220, 1975.
- T. Jacobson, 'Thermodynamics of Spacetime: The Einstein Equation of State', *Physical Review Letters*, vol. 75, no. 7, pp. 1260–1263, 1995.
- G. 't Hooft, 'Dimensional Reduction in Quantum Gravity', *arXiv:gr-qc/9310026*, 1993.
- L. Susskind, 'The World as a Hologram', *Journal of Mathematical Physics*, vol. 36, pp. 6377–6396, 1995.
- R. Bousso, 'The Holographic Principle', *Reviews of Modern Physics*, vol. 74, no. 3, pp. 825–874, 2002.
- J. A. Wheeler, 'Information, Physics, Quantum: The Search for Links', en W. Zurek (ed.), *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*. Addison-Wesley, 1990.
- C. E. Shannon, 'A Mathematical Theory of Communication', *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, 623–656, 1948.
- V. Cardoso, E. Hopper, C. F. B. Macedo, C. Palenzuela y P. Pani, 'Gravitational-Wave Signatures of Exotic Compact Objects and of Quantum Corrections at the Horizon Scale', *Physical Review D*, vol. 94, no. 8, 084031, 2016.
- V. Cardoso y P. Pani, 'Tests for the existence of horizons through gravitational wave echoes', *Nature Astronomy*, vol. 1, no. 9, pp. 586–591, 2017.
- J. Abedi, H. Dykaar y N. Afshordi, 'Echoes from the Abyss: Tentative Evidence for Planck-Scale Structure at Black Hole Horizons', *Physical Review D*, vol. 96, no. 8, 082004, 2017.
- Q. Wang y N. Afshordi, 'Black Hole Echology: The Observer's Manual', *Physical Review D*, vol. 97, no. 12, 124044, 2018.
- R. T. Cox, 'Probability, Frequency and Reasonable Expectation', *American Journal of Physics*, vol. 14, pp. 1–13, 1946.
- L. Hardy, 'Quantum Theory from Five Reasonable Axioms', *arXiv:quant-ph/0101012*, 2001.
- J. D. van der Waals, *Over de Continuïteit van den Gas- en Vloeistoestand*, Leiden, 1873.

J. D. Bekenstein, 'Information in the Holographic Universe', Scientific American, agosto 2003.

F. Figueroa Gutiérrez, 'Teoría Σ : Versiones 1–10', documentos internos, 2025–2026.

F. Figueroa Gutiérrez, 'QM desde Σ : Derivación Formal', documento interno, Marzo 2026.