

TEORÍA Σ

La Inevitabilidad de Σ

Distinción, Realidad y el Límite Físico de la Existencia

Dos bits no pueden ocupar el soporte
geométrico de un solo bit

Fernando Figueroa Gutiérrez

Investigador Independiente · Delicias, Chihuahua, México

Documento complementario — Derivaciones matemáticas extendidas

Resumen

Este documento presenta la arquitectura matemática completa del argumento de inevitabilidad de la Teoría Σ . Cada enunciado filosófico del ensayo principal es aquí expandido en una derivación rigurosa, con justificación explícita de cada paso.

El hilo conductor es una sola restricción operacional:

$$0 < B < \infty, \quad [B] = L^2$$

el costo mínimo finito de toda distinción física

De esta restricción mínima se derivan, sin parámetros libres adicionales, los siguientes resultados:

- (1) El costo entrópico mínimo por bit: $\Delta S = B/4$
 - (2) El límite holográfico: $S \leq A / (4B)$
 - (3) La saturación geométrica: $R \leq 1/B$
 - (4) La ley constitutiva única: $f(R) = R / (1 + BR)$
 - (5) La irreversibilidad como consecuencia ontológica del costo
 - (6) La mecánica cuántica como límite de distinguibilidad física
 - (7) La densidad de energía del vacío regulada: $\rho_{\text{vac}} \sim H^2$
-

Capítulo 1. La Distinción como Condición Trascendental

La pregunta de partida no es física en el sentido ordinario. Es anterior a la geometría, al tiempo, a la dinámica. Pregunta por la condición mínima necesaria para que exista algo físicamente describible.

1.1 El argumento por reducción al absurdo

Supongamos que fuera posible una realidad física sin distinción. En tal caso:

- No habría estados diferenciables, luego no habría información.
- No habría observables, luego no habría medición.
- No habría dinámica, luego no habría tiempo.

Pero una física sin estados, sin medición y sin tiempo no es física: es indistinción absoluta, idéntica a la nada física. La hipótesis se destruye a sí misma.

1.2 El argumento autorreferencial formal

Sea D la distinción. Supongamos la negación:

$$\neg D \tag{1.1}$$

Para afirmar $\neg D$ debemos distinguir:

- la afirmación $\neg D$, de
- aquello que es negado (D).

Pero distinguir dos cosas es precisamente ejercer D . Formalmente:

$$\neg D \Rightarrow D \tag{1.2}$$

La negación de D realiza D . Por tanto D no es una hipótesis contingente sino una condición lógico-física necesaria.

Teorema 1.1 — Inevitabilidad de la distinción

En todo marco donde sea posible formular enunciados físicos, la distinción es condición de posibilidad. No puede ser negada sin realizarse en el acto de negarla.

Capítulo 2. Minimalidad Binaria y el Bit como Primitivo Físico

2.1 Por qué la cardinalidad mínima es 2

Sea D_n una distinción con cardinalidad n (número de estados distinguibles).

Caso $n = 1$: existe un único estado. No hay diferencia entre estados, luego no hay distinción. $D_1 = \emptyset$. Contradicción.

Caso $n \geq 3$: para identificar tres o más estados se requiere:

- (a) un orden entre ellos, o
- (b) una métrica, o
- (c) etiquetas adicionales.

Todo lo anterior requiere estructura previa que el sustrato aún no ha producido. Por economía ontológica, no puede asumirse.

Caso $n = 2$: es el único compatible con distinción sin estructura previa:

$$\{A, \neg A\} \tag{2.1}$$

Este par es irreducible: eliminar cualquiera de los dos elementos destruye la distinción.

Corolario 2.1 — El bit como unidad ontológica mínima

El bit $\sigma \in \{0, 1\}$ no es una convención tecnológica ni un artefacto de teoría de la información. Es la forma físicamente mínima e irreducible de distinción realizable.

2.2 Variable binaria y espacio de estados

Formalizamos: sea $\sigma_i \in \{0, 1\}$ la variable de distinción elemental del evento i . El espacio de estados para N distinciones es:

$$\Omega_N = \{0,1\}^N, \quad |\Omega_N| = 2^N \tag{2.2}$$

La entropía de Shannon para la distribución uniforme (máxima ignorancia) es:

$$S_{\text{Shannon}} = \log_2(2^N) = N \text{ bits} \tag{2.3}$$

Cada bit es exactamente una distinción. La entropía cuenta distinciones.

Capítulo 3. Realizabilidad Física y el Costo de la Distinción

3.1 Diferencia entre distinción lógica y distinción física

Una distinción lógica es una diferencia formal entre símbolos. No requiere energía, tiempo ni soporte material. La física, sin embargo, requiere que los estados puedan:

- Verificarse mediante medición.
- Interactuar causalmente con otros sistemas.
- Persistir con coherencia temporal suficiente para ser distinguibles.

Estas condiciones implican que toda distinción física requiere un proceso: una transición verificadora.

3.2 La transición como condición de realidad física

Definición: una transición es el proceso mínimo que convierte una distinción lógica en un hecho físico registrable.

Sea $t_{\{ij\}}$: $s_i \rightarrow s_j$ la transición del estado s_i al estado s_j . Para que esta transición sea físicamente real debe:

- (T1) Ser distinguible de la no-transición (identidad).
- (T2) Producir una diferencia en al menos un observable.
- (T3) Requerir un costo finito (de lo contrario sería idéntica a la no-transición).

3.3 Derivación del costo mínimo B

Sea c el costo de una transición elemental. Analizamos los límites:

Paso 1. Hipótesis de costo nulo: $c = 0$

$$c = 0 \tag{1}$$

Si $c = 0$, la transición sería físicamente indistinguible de la no-transición (ambas tendrían el mismo costo). Por T1, esto niega la realizabilidad de la transición. Por T2, no hay diferencia observable. Contradicción: no hay distinción.

Paso 2. Hipótesis de costo infinito: $c \rightarrow \infty$

$$c \rightarrow \infty \tag{2}$$

Si $c \rightarrow \infty$, ninguna transición puede ocurrir en un sistema con recursos finitos. No existe dinámica. No existe tiempo. No existe física. Contradicción.

Paso 3. Consecuencia: el costo debe ser positivo y finito

$$0 < c < \infty \tag{3}$$

Existe un costo mínimo irreducible. Llamamos B al área mínima que dicho costo representa:

$$0 < B < \infty, \quad [B] = L^2$$

Restricción operacional fundamental

La dimensión $[B] = L^2$ se justifica en el Capítulo 4. La identificación numérica $B = \ell_P^2 = \hbar G/c^3$ emerge de la consistencia termodinámica (Capítulo 5).

3.4 El costo entrópico por bit

Queremos determinar cuánta entropía produce cada distinción elemental. Utilizamos el argumento de Bekenstein-Hawking como guía de consistencia.

Paso 1. Asociar una distinción elemental a un grado de libertad en la frontera de área A

$$N_{\max} = A / B \quad (1)$$

Si cada bit ocupa un área mínima B , el número máximo de bits en una frontera de área A es $N_{\max} = A/B$.

Paso 2. Entropía de Boltzmann para N_{\max} estados binarios independientes

$$S = k_B \log_2(2^{N_{\max}}) = N_{\max} \cdot k_B \log 2 \quad (2)$$

Paso 3. En unidades naturales ($k_B = 1$, log en base e)

$$S = N_{\max} \cdot \log 2 = (A/B) \cdot \log 2 \quad (3)$$

Paso 4. La cota de Bekenstein-Hawking exige $S = A/(4\ell_P^2)$ para la entropía máxima de un horizonte

$$S_{\{BH\}} = A / (4\ell_P^2) \quad (4)$$

Paso 5. Igualando ambas expresiones para fijar el costo por bit

$$(A/B) \cdot \log 2 = A / (4\ell_P^2) \quad (5)$$

Paso 6. Despejando B

$$B = 4\ell_P^2 \cdot \log 2 \approx 4 \times (2.612 \times 10^{-70} \text{ m}^2) \quad (6)$$

En la convención estándar de Σ donde se normaliza para que la cota tome la forma exacta $S \leq A/(4B)$, el factor $\log 2$ queda absorbido en la definición de unidades entrópicas y se obtiene:

$$\Delta S = B / 4 \quad \text{por cada distinción elemental} \quad (3.1)$$

Capítulo 4. Geometrización de la Distinción

4.1 Por qué la distinción induce frontera

Una distinción entre dos estados A y $\neg A$ implica que existe una separación entre ellos. Esa separación, para ser físicamente real, debe tener soporte geométrico.

El soporte geométrico de la separación entre dos regiones es su frontera común. La medida geométrica mínima de una frontera en un espacio físico es el área (no la longitud, que requiere estructura unidimensional previa; no el volumen, que excede la frontera).

4.2 Derivación de $[B] = L^2$

Paso 1. Una distinción elemental separa dos regiones del sustrato

$$\{\text{región } A\} \mid \{\text{región } \neg A\} \quad (1)$$

Paso 2. La separación exige una frontera de soporte mínimo

$$\text{Frontera: } \partial(\text{región } A) \quad (2)$$

Paso 3. La medida geométrica mínima consistente de una frontera es el área

$$[\text{soporte mínimo}] = L^2 \quad (3)$$

Paso 4. El costo B es proporcional a este soporte mínimo, luego

$$[B] = L^2 \quad (4)$$

Teorema 4.1 — Geometrización de la información

La información no es una entidad abstracta independiente de la geometría. Toda distinción físicamente realizable tiene soporte geométrico de dimensión $[L^2]$. La información es geométrica desde el primer acto de distinción.

4.3 Identificación de B con la longitud de Planck

La longitud de Planck es la única escala que combina las constantes fundamentales \hbar , G y c en una longitud:

$$\ell_P = \sqrt{(\hbar G/c^3)} \approx 1.616 \times 10^{-35} \text{ m} \quad (4.1)$$

El área de Planck correspondiente es:

$$\ell_P^2 = \hbar G/c^3 \approx 2.612 \times 10^{-70} \text{ m}^2 \quad (4.2)$$

La identificación $B = \ell_P^2$ no se postula sino que emerge de la consistencia termodinámica:

- La entropía de un horizonte esférico de área A debe satisfacer $S = A/(4B)$.
- La relatividad general predice $S_{\{BH\}} = A/(4\ell_P^2)$ para horizontes de Killing.
- Igualando: $B = \ell_P^2 = \hbar G/c^3$.

$$B = \ell_P^2 = \hbar G/c^3 \approx 2.612 \times 10^{-70} \text{ m}^2 \quad (4.3) \text{ — El área mínima de distinción}$$

Las tres constantes que la física convencional toma como independientes se derivan de B:

$$\hbar = Bc^3/G, \quad G = Bc^3/\hbar, \quad c = (\hbar G/B)^{1/3} \quad (4.4)$$

Capítulo 5. El Principio Central de Σ y la Exclusión Geométrica

5.1 Enunciado del principio

Dos bits no pueden ocupar el soporte geométrico de un solo bit
Principio Central de Σ

Este enunciado parece simple. Sus consecuencias son totales. Vamos a derivarlas una por una.

5.2 Derivación formal de la exclusión informacional

Paso 1. Sea A el área total de una región del sustrato

Paso 2. Cada bit requiere un área mínima B

$$\text{área_por_bit} = B \tag{2}$$

Paso 3. El número máximo de bits en A es

$$N_{\max} = A / B \tag{3}$$

Paso 4. Supongamos que pudieran alojarse $N > A/B$ bits. Entonces al menos dos bits compartirían soporte de área $< B$. Pero B es el mínimo indivisible. Contradicción.

Paso 5. Por tanto, el número de distinciones está estrictamente acotado

$$N \leq A / B \tag{5}$$

Teorema 5.1 — Exclusión informacional

En toda región con frontera de área A, el número máximo de distinciones físicamente realizables es $N_{\max} = A/B$. No es posible almacenar información infinita en soporte geométrico finito.

5.3 Consecuencias inmediatas del principio

Del principio central se siguen directamente:

1. Límite holográfico (demostrado en Capítulo 6).
 2. Saturación geométrica: la curvatura no puede superar $1/B$ (Capítulo 7).
 3. Granularidad física: el espacio no es continuo a escala B.
 4. Finitud UV: no existe divergencia ultravioleta en el sustrato.
 5. Irreversibilidad: el costo ya pagado no puede recuperarse (Capítulo 9).
 6. Conservación de información: si N_{\max} está acotado, la información no se pierde sino que se redistribuye.
-

Capítulo 6. Emergencia Holográfica

6.1 Derivación paso a paso de $S \leq A/(4B)$

El principio holográfico de 't Hooft y Susskind establece que la información en un volumen está codificada en su frontera. En Σ , este principio no es un postulado: es una consecuencia directa.

Paso 1. Cada distinción elemental produce entropía $\Delta S = B/4$ (derivado en §3.4)

$$\Delta S_1 = B/4 \quad (1)$$

Paso 2. El número máximo de distinciones en una frontera de área A es $N_{\max} = A/B$ (Teorema 5.1)

$$N_{\max} = A / B \quad (2)$$

Paso 3. La entropía total máxima es la suma de los costos entrópicos de todas las distinciones

$$S_{\max} = N_{\max} \cdot \Delta S_1 \quad (3)$$

Paso 4. Sustituyendo

$$S_{\max} = (A/B) \cdot (B/4) = A/4 \quad (4)$$

Paso 5. En unidades donde $B = \ell_P^2 = \hbar G/c^3$

$$S_{\max} = A / (4\ell_P^2) \quad (5)$$

$$S \leq A / (4B) \\ (6.1) \text{ — Cota holográfica de Bekenstein}$$

Esta es exactamente la fórmula de entropía de Bekenstein-Hawking para horizontes gravitacionales. En Σ no se postula; se deriva del costo mínimo de distinción.

6.2 Interpretación geométrica

La cota holográfica tiene una interpretación geométrica directa: la frontera de una región es el soporte máximo de información sobre su interior. El volumen no tiene grados de libertad independientes de la frontera.

En términos de densidad de distinción:

$$\sigma_{\max} = N_{\max} / A = 1/B \quad (6.2)$$

La densidad máxima de distinciones por unidad de área es exactamente $1/B$. Este es el parámetro de saturación de Σ .

6.3 Verificación de consistencia dimensional

Verificamos que la cota $S \leq A/(4B)$ tiene dimensiones correctas:

$$[A] = L^2, \quad [B] = L^2 \implies [A/B] = \text{adimensional} = [\text{entropía en unidades naturales}] \quad (6.3)$$

Capítulo 7. Saturación Geométrica y la Cota $R \leq 1/B$

7.1 Motivación: ¿por qué la curvatura no puede ser arbitraria?

En la relatividad general estándar, la curvatura escalar R puede tomar cualquier valor, incluido $R \rightarrow \infty$ en singularidades. En Σ , la curvatura no es fundamental sino emergente de la densidad de distinciones. Una densidad máxima implica una curvatura máxima.

7.2 Derivación de la cota de curvatura

Paso 1. La densidad local de distinciones por unidad de área es ρ_Σ

$$\rho_\Sigma = dN/dA \quad (1)$$

Paso 2. La saturación ocurre cuando $\rho_\Sigma = \sigma_{\max} = 1/B$

$$\rho_\Sigma^{\text{sat}} = 1/B \quad (2)$$

Paso 3. La curvatura escalar en el régimen geométrico efectivo es proporcional a la densidad de distinciones

$$R \propto \rho_\Sigma \quad (3)$$

Paso 4. La respuesta del sustrato debe ser no-lineal: cuando $\rho_\Sigma \rightarrow 1/B$, la curvatura debe saturar. La función más simple que satisface esta condición y tiene límite lineal para $\rho_\Sigma \ll 1/B$ es la transformación de Möbius-Padé de orden [1/1]:

$$R(\rho_\Sigma) = \rho_\Sigma / (1 + B\rho_\Sigma) \quad (4)$$

Paso 5. Verificar el límite de baja densidad (régimen relatividad general)

$$\rho_\Sigma \ll 1/B \implies R \approx \rho_\Sigma \quad [\text{RG recuperada}] \quad (5)$$

Paso 6. Verificar el límite de saturación

$$\rho_\Sigma \rightarrow \infty \implies R \rightarrow 1/B \quad [\text{cota finita}] \quad (6)$$

$$R \leq 1/B \approx 3.83 \times 10^{69} \text{ m}^{-2}$$

(7.1) — Cota de curvatura de Σ

Las singularidades de la relatividad general ($R \rightarrow \infty$) quedan excluidas ontológicamente: no representan configuraciones físicamente realizables en Σ , sino el límite del lenguaje geométrico efectivo.

7.3 Unicidad de la respuesta saturante

La función $R(\rho_\Sigma) = \rho_\Sigma / (1 + B\rho_\Sigma)$ es la única que satisface simultáneamente:

- Límite lineal: $R \approx \rho_\Sigma$ para $\rho_\Sigma \ll 1/B$.
- Saturación: $R \rightarrow 1/B$ para $\rho_\Sigma \rightarrow \infty$.
- Monotonía: $dR/d\rho_\Sigma > 0$ (la curvatura crece con la densidad).
- Concavidad: $d^2R/d\rho_\Sigma^2 < 0$ (la respuesta se aplana cerca de la saturación).
- Analítica en $\rho_\Sigma = 0$ (sin singularidades en el régimen efectivo).
- Cero parámetros libres adicionales (solo B aparece).

Ninguna otra función analítica de la forma $R(\rho_\Sigma)$ satisface las seis condiciones simultáneamente.

Capítulo 8. La Ley Constitutiva Única: $f(R) = R/(1+BR)$

8.1 De la respuesta del sustrato a la acción gravitacional

La respuesta saturante $R(\rho_\Sigma) = \rho_\Sigma/(1 + B\rho_\Sigma)$ puede invertirse. Dado R , la densidad de excitaciones que lo produce es:

Paso 1. Invertir $R(\rho_\Sigma) = \rho_\Sigma/(1 + B\rho_\Sigma)$ para obtener $\rho_\Sigma(R)$

$$\rho_\Sigma = R / (1 - BR) \quad (1)$$

Paso 2. En el régimen geométrico, la acción de gravedad se construye con $f(R)$ tal que la variación produce ecuaciones de campo. La condición es que $f(R)$ sea la primitiva funcional de la respuesta del sustrato.

$$f(R) = R / (1 + BR) \quad (2)$$

Verificación: la derivada de f con respecto a R es:

Paso 3. Calcular $f'(R)$

$$f'(R) = 1/(1+BR)^2 > 0 \quad \checkmark \quad (3)$$

Paso 4. Calcular $f''(R)$

$$f''(R) = -2B/(1+BR)^3 < 0 \quad \checkmark \quad (4)$$

Paso 5. Límite de baja curvatura $BR \ll 1$

$$f(R) \approx R(1 - BR) \rightarrow R \quad [\text{recupera RG}] \quad \checkmark \quad (5)$$

Paso 6. Límite de saturación $BR \rightarrow 1$

$$f(R) \rightarrow 1/B \quad [\text{finito}] \quad \checkmark \quad (6)$$

8.2 La acción efectiva de Σ

La acción de Einstein-Hilbert modificada con $f(R)$ es:

$$S = (1/16\pi G) \int d^4x \sqrt{(-g)} f(R), \quad f(R) = R/(1+BR) \quad (8.1)$$

Esta es la única acción gravitacional que:

- Recupera la RG en el límite $BR \ll 1$.
- Elimina singularidades ($R \leq 1/B$).
- Tiene estabilidad dinámica ($f' > 0, f'' < 0$).
- No contiene parámetros libres más allá de $B = \ell_P^2$.

8.3 Ecuaciones de campo

La variación de la acción con respecto a la métrica $g_{\{\mu\nu\}}$ produce:

$$f'(R) G_{\{\mu\nu\}} + [1/2(f(R) - Rf'(R)) - \square f'(R)] g_{\{\mu\nu\}} + \nabla_\mu \nabla_\nu f'(R) = 8\pi G T_{\{\mu\nu\}} \quad (8.2)$$

donde $G_{\{\mu\nu\}} = R_{\{\mu\nu\}} - \frac{1}{2}Rg_{\{\mu\nu\}}$ es el tensor de Einstein y $\square = g^{\{\mu\nu\}}\nabla_{\mu}\nabla_{\nu}$ es el d'alembertiano covariante.

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

$$G_{\{\mu\nu\}}/(1+BR)^2 + \Lambda_{\text{eff}}(R) g_{\{\mu\nu\}} + (\text{términos de gradiente de } R) = 8\pi G T_{\{\mu\nu\}} \quad (8.3)$$

donde $\Lambda_{\text{eff}}(R)$ es una constante cosmológica efectiva que depende de R , no fijada externamente sino emergente de la saturación.

Capítulo 9. Tiempo, Irreversibilidad y Flecha Termodinámica

9.1 El tiempo no preexiste a la distinción

El tiempo ordinario se concibe como una dimensión dentro de la cual ocurren los eventos. En Σ , el orden es inverso: el tiempo emerge del conteo ordenado de distinciones.

Teorema 9.1 — Emergencia del tiempo

Una sola distinción no tiene tiempo (no hay 'antes' ni 'después' dentro de un único acto). El tiempo emerge cuando existe al menos un par de distinciones que pueden ordenarse causalmente.

9.2 Derivación de la irreversibilidad

Paso 1. Cada distinción tiene un costo entrópico $\Delta S = B/4 > 0$

$$\Delta S_{\{\text{distinción}\}} = B/4 > 0 \quad (1)$$

Paso 2. La entropía total después de N distinciones es

$$S_N = N \cdot B/4 \quad (2)$$

Paso 3. Para revertir N distinciones y recuperar el estado inicial sería necesario 'devolver' la entropía $\Delta S = N \cdot B/4$. Pero la segunda ley de la termodinámica establece que la entropía no disminuye espontáneamente en sistemas aislados.

Paso 4. En Σ , esto tiene un fundamento más profundo: el costo ya fue pagado al sustrato. No hay mecanismo de devolución sin un agente externo con costo adicional mayor.

$$\Delta S_{\{\text{reversión}\}} \geq N \cdot B/4 \quad (4)$$

Paso 5. La irreversibilidad es entonces una consecuencia directa del costo finito positivo de cada distinción

$$\Delta S_{\text{total}} \geq N \cdot B/4 > 0 \quad \text{para } N > 0 \quad (5)$$

La flecha del tiempo en Σ no se postula ni se toma de la termodinámica fenomenológica. Emerge del hecho de que cada distinción consume irreversiblemente un cuanto de área-entropía $B/4$.

9.3 El tiempo como conteo de distinciones

Si t es el tiempo y cada distinción ocurre en un lapso mínimo τ_P (tiempo de Planck), entonces:

$$t = N \cdot \tau_P, \quad \tau_P = \sqrt{(\hbar G/c^5)} \approx 5.39 \times 10^{-44} \text{ s} \quad (9.1)$$

El tiempo es cuantizado en Σ a escala de Planck. No hay 'instantes' arbitrariamente pequeños.

La entropía como función del tiempo es:

$$S(t) = (t/\tau_P) \cdot (B/4) = t \cdot (B / 4\tau_P) \quad (9.2)$$

Esta es la tasa de producción entrópica del sustrato: una constante universal fijada solo por B y τ_P .

Capítulo 10. La Mecánica Cuántica como Límite de Distinguibilidad

10.1 El origen de la incertidumbre

La mecánica cuántica introduce incertidumbre, superposición y límites de resolución como axiomas. En Σ , estos fenómenos tienen una explicación más profunda: son consecuencias del costo finito de la distinción.

10.2 Derivación del principio de incertidumbre

Paso 1. Para distinguir dos estados de posición separados por Δx , se requiere al menos una distinción en la coordenada espacial

$$\text{costo_posición} \propto \Delta S_x = B/4 \quad (1)$$

Paso 2. Para distinguir dos estados de momento separados por Δp , se requiere al menos una distinción en la coordenada de momento

$$\text{costo_momento} \propto \Delta S_p = B/4 \quad (2)$$

Paso 3. En el espacio de fase, la distinción simultánea (posición, momento) requiere conocer la celda mínima de fase. El costo total de distinguir un estado en fase es la suma

$$\Delta S_{\{total\}} = \Delta S_x + \Delta S_p \geq B/2 \quad (3)$$

Paso 4. La celda mínima del espacio de fase tiene área B (en unidades donde $\hbar = B/4\pi$):

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq B / (4\pi) = \hbar/2 \quad (4)$$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

(10.1) — Principio de incertidumbre de Heisenberg

El principio de incertidumbre no se postula: emerge del costo mínimo de distinción en el espacio de fase.

10.3 La superposición como indistinguibilidad parcial

Cuando el costo de la distinción no puede ser pagado completamente por el sustrato (por ejemplo, cuando la densidad de distinciones se acerca a $\sigma_{max} = 1/B$), la distinción es parcial.

Un estado 'en superposición' $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ con $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ representa la situación en que el sustrato no ha completado el pago del costo para distinguir $|0\rangle$ de $|1\rangle$.

La probabilidad $|\alpha|^2$ es la fracción del costo de distinción ya pagada hacia el estado $|0\rangle$. La medición completa el pago y colapsa la superposición.

10.4 La constante de Planck desde B

La identificación $B = \hbar G/c^3$ permite expresar \hbar en función de B :

$$\hbar = Bc^3/G \approx 1.055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \quad (10.2)$$

La constante de Planck es una traducción de B al lenguaje de la mecánica cuántica. No es independiente.

Capítulo 11. La Energía del Vacío como Costo de Sostenimiento

11.1 El problema estándar

La teoría cuántica de campos (TQC) predice una densidad de energía del vacío del orden:

$$\rho_{\text{vac}}^{\text{TQC}} \sim \Lambda_{\text{UV}}^4 / (16\pi^2 \hbar^3 c^3) \quad (11.1)$$

Con corte ultravioleta en la escala de Planck $\Lambda_{\text{UV}} \sim \hbar c / \ell_{\text{P}}$:

$$\rho_{\text{vac}}^{\text{TQC}} \sim \hbar c / \ell_{\text{P}}^4 \sim 10^{96} \text{ kg/m}^3 \quad (11.2)$$

La densidad observada es:

$$\rho_{\text{obs}} \sim 10^{-27} \text{ kg/m}^3 \quad (11.3)$$

La discrepancia es de 10^{123} órdenes de magnitud. Este es el peor problema de ajuste fino de la física.

11.2 La corrección de Σ : grados de libertad holográficos

Paso 1. En Σ , los grados de libertad en un volumen V no son volumétricos sino holográficos. El número máximo de modos independientes en V es:

$$N_{\text{max}} = A_V / (4B) \quad (1)$$

Paso 2. donde A_V es el área de la frontera de V . No existen modos independientes que excedan este número.

Paso 3. La densidad de energía del vacío está regulada por la curvatura media del espacio, no por el corte UV:

$$\rho_{\text{vac}}^{\Sigma} \sim R / (8\pi G) \quad (3)$$

Paso 4. En el universo homogéneo e isótropo, la curvatura media a escala cosmológica es del orden de H^2 (donde H es la constante de Hubble):

$$R_{\text{cosmológico}} \sim 12H^2/c^2 \quad (4)$$

Paso 5. Por tanto la densidad de energía del vacío efectiva en Σ es:

$$\rho_{\text{vac}}^{\Sigma} \sim H^2 / G \sim 10^{-27} \text{ kg/m}^3 \quad (5)$$

$$\rho_{\text{vac}}^{\Sigma} \sim H^2/G \sim \rho_{\text{obs}} \quad (11.1) \text{ — Sin ajuste fino}$$

Σ reproduce el valor observado de la densidad de energía oscura sin ningún parámetro libre ni ajuste fino. La 'constante cosmológica' no es una constante sino una función de la curvatura media actual.

11.3 Predicción falsable: ecuación de estado $w(z) \neq -1$

Si la energía oscura es la presión entrópica del sustrato en expansión, su ecuación de estado debe variar con el redshift:

$$w(z) = p_{\text{vac}} / \rho_{\text{vac}} \neq -1 \text{ (estrictamente)} \quad (11.2)$$

En particular, para un universo con expansión acelerada regulada por Σ :

$$w(z) \approx -1 + (2/3) \Omega_m(z) / (1 - \Omega_m(z)) \cdot (1/N_{\text{bits}}(z)) \quad (11.3)$$

Esta desviación de $w = -1$ es una predicción cuantitativa falsable con telescopios de siguiente generación (DESI, Euclid, LSST).

Capítulo 12. Condiciones de Refutación del Marco

Σ no es un dogma. Es un marco falsable. Su refutación completa requeriría demostrar al menos una de las siguientes posibilidades:

12.1 Las cinco negaciones

Negación 1: Realidad física sin distinción

Mostrar que existe realidad física en la que ningún estado difiere de ningún otro. Consecuencia: no habría observables ni dinámica. El marco experimental completo colapsaría. Esta negación es autodestructiva.

Negación 2: Distinción física sin transición

Mostrar que dos estados pueden ser físicamente distintos sin que exista ningún proceso verificador entre ellos. Requeriría un dualismo platónico incompatible con la física empírica: estados sin interacción posible.

Negación 3: Transición física sin costo

Mostrar que existe un proceso físico real (verificable, causal) con costo exactamente cero. Esto permitiría almacenar información infinita en soporte finito, contradiciendo directamente la cota de Bekenstein.

Negación 4: Información infinita en soporte finito

Demostrar experimentalmente que una región de área finita puede contener información ilimitada. Contradice holografía, termodinámica de agujeros negros y la resolución finita de cualquier detector físico.

Negación 5: Curvatura física infinita realizable

Observar una singularidad física real (no una predicción de modelo): un punto del espacio-tiempo donde la curvatura sea literalmente infinita y medible. Esto requeriría acceso experimental al interior de singularidades, actualmente imposible.

12.2 Criterio de superioridad empírica

El marco queda refutado también si se formula una teoría alternativa con:

- Igual o menor carga ontológica (no más primitivos que distinción, transición, finitud).
- Ausencia de singularidades físicas observables.
- Conservación global de información.
- Emergencia del espacio-tiempo como descripción efectiva.
- Coherencia entre escalas sin parámetros libres.

Ninguna teoría actual cumple simultáneamente estas cinco condiciones.

Capítulo 13. Cierre Lógico: La Cadena Deductiva Completa

13.1 Diagrama de la derivación maestra

Todo el argumento de inevitabilidad puede resumirse en la siguiente cadena deductiva, en la que cada paso es necesario:

① **Distinción es condición trascendental de posibilidad** (Capítulo 1)

↓ necesariamente implica

② **La forma mínima de distinción es binaria: $\{A, \neg A\}$** (Capítulo 2)

↓ necesariamente implica

③ **La distinción física requiere transición verificadora** (Capítulo 3)

↓ necesariamente implica

④ **La transición tiene un costo c : $0 < c < \infty$** (Capítulo 3)

↓ necesariamente implica

⑤ **El costo tiene soporte geométrico: $[c] = L^2 \rightarrow B$** (Capítulo 4)

↓ necesariamente implica

⑥ **Dos bits no pueden ocupar el soporte de uno** (Capítulo 5)

↓ se derivan

⑦ $S \leq A/(4B)$ ⑧ $R \leq 1/B$ ⑨ $f(R) = R/(1+BR)$ (Capítulos 6, 7, 8)

↓ se derivan además

⑩ **Irreversibilidad** ⑪ **Incertidumbre** ⑫ $\rho_{vac} \sim H^2$ (Capítulos 9–11)

13.2 La restricción que lo resume todo

Todo el edificio de Σ descansa en una única restricción operacional:

$$0 < B < \infty, \quad [B] = L^2, \quad B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$$

La restricción mínima de existencia física

De esta restricción, y solo de ella, emergen sin parámetros libres adicionales:

la holografía, la curvatura máxima, la ley gravitacional única, la irreversibilidad, la incertidumbre cuántica, y la energía oscura como costo de sostenimiento del sustrato.

13.3 Lo que Σ no responde

La única pregunta que Σ no puede responder desde dentro es:

¿Por qué el precio no es cero?

Esta pregunta no tiene respuesta física. Tiene solo una observación: si el precio fuera cero, no habría distinción entre existir y no existir. Y entonces no habría nada. Y no habría nadie preguntando.

Σ no explica por qué existe algo en lugar de nada. Σ explica la estructura mínima que debe tener ese algo para poder ser llamado real.

Apéndice. Tabla de Símbolos y Constantes

Símbolo	Definición	Valor / Dimensión
B	Área mínima de distinción	$\ell_P^2 = \hbar G/c^3 \approx 2.612 \times 10^{-70} \text{ m}^2$
ℓ_P	Longitud de Planck	$\sqrt{\hbar G/c^3} \approx 1.616 \times 10^{-35} \text{ m}$
τ_P	Tiempo de Planck	$\sqrt{\hbar G/c^5} \approx 5.39 \times 10^{-44} \text{ s}$
ΔS	Costo entrópico por distinción	B/4 [adimensional en unidades naturales]
N_max	Máximo de distinciones en área A	A/B
S_max	Entropía máxima en área A	A/(4B) [cota de Bekenstein]
σ_{max}	Densidad máxima de distinciones	1/B [L ⁻²]
R_max	Curvatura escalar máxima	1/B $\approx 3.83 \times 10^{69} \text{ m}^{-2}$
f(R)	Lagrangiano gravitacional de Σ	R/(1+BR)
ρ_Σ	Densidad de distinciones local	[L ⁻²]
σ_i	Variable de distinción elemental	$\in \{0,1\}$
C_ij	Matriz de correlación	$\langle \sigma_i \sigma_j \rangle - \langle \sigma_i \rangle \langle \sigma_j \rangle$
w(z)	Ecuación de estado de energía oscura	$\neq -1$ (predicción falsable)

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

Fundamentos de distincion e informacion

1. Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423.
2. Turing, A. M. (1936). On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*.
3. Landauer, R. (1961). Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process. *IBM Journal of Research and Development*, 5(3), 183-191.
4. Bennett, C. H. (1982). The Thermodynamics of Computation. *International Journal of Theoretical Physics*, 21, 905-940.
5. Chaitin, G. J. (1975). A Theory of Program Size Formally Identical to Information Theory. *Journal of the ACM*.

Termodinamica y limite holografico

6. Boltzmann, L. (1877). Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung. *Wiener Berichte*.
7. Bekenstein, J. D. (1973). Black Holes and Entropy. *Physical Review D*, 7(8), 2333-2346.
8. Hawking, S. W. (1975). Particle Creation by Black Holes. *Communications in Mathematical Physics*, 43(3), 199-220.
9. Hawking, S. W. (1976). Black Holes and Thermodynamics. *Physical Review D*, 13(2), 191-197.
10. 't Hooft, G. (1993). Dimensional Reduction in Quantum Gravity. *arXiv:gr-qc/9310026*.
11. Susskind, L. (1995). The World as a Hologram. *Journal of Mathematical Physics*, 36(11), 6377-6396.
12. Bousso, R. (2002). The Holographic Principle. *Reviews of Modern Physics*, 74(3), 825-874.

Gravedad, geometria y saturacion

13. Einstein, A. (1915). Die Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften*.
14. Planck, M. (1899). Über irreversible Strahlungsvorgänge. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie*.
15. Buchdahl, H. A. (1970). Non-linear Lagrangians and Cosmological Theory. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 150, 1-8.
16. Starobinsky, A. A. (1980). A New Type of Isotropic Cosmological Models Without Singularity. *Physics Letters B*, 91(1), 99-102.
17. Sotiriou, T. P., & Faraoni, V. (2010). f(R) Theories of Gravity. *Reviews of Modern Physics*, 82(1), 451-497.

Mecanica cuantica emergente

18. Heisenberg, W. (1925). Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Zeitschrift für Physik*.
19. Schrodinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem. *Annalen der Physik*.
20. Dirac, P. A. M. (1930). *The Principles of Quantum Mechanics*. Oxford University Press.
21. von Neumann, J. (1932). *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Springer.
22. Berry, M. V. (1984). Quantal Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes. *Proceedings of the Royal Society A*, 392(1802), 45-57.

Cosmologia y estructura a gran escala

23. Friedmann, A. (1922). Über die Krümmung des Raumes. *Zeitschrift für Physik*, 10, 377-386.
24. Lemaitre, G. (1927). Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant. *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*.
25. Guth, A. H. (1981). Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems. *Physical Review D*, 23(2), 347-356.
26. Planck Collaboration. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6.
27. Padmanabhan, T. (2005). Understanding Our Universe: Current Status and Open Issues. *arXiv:gr-qc/0503107*.
28. Verlinde, E. P. (2011). On the Origin of Gravity and the Laws of Newton. *Journal of High Energy Physics*, 2011(4), 29.

Asimetria, quiralidad y materia

29. Sakharov, A. D. (1967). Violation of CP Invariance, C asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe. *JETP Letters*, 5, 24-27.
30. Fukugita, M., & Yanagida, T. (1986). Baryogenesis Without Grand Unification. *Physics Letters B*, 174(1), 45-47.

Falsabilidad y observaciones contemporaneas

31. Cardoso, V., Franzin, E., & Pani, P. (2016). Is the Gravitational-Wave Ringdown a Probe of the Event Horizon? *Physical Review Letters*, 116(17), 171101.
32. Abedi, J., Dykaar, H., & Afshordi, N. (2017). Echoes from the Abyss: Tentative Evidence for Planck-Scale Structure at Black Hole Horizons. *Physical Review D*, 96(8), 082004.
33. LISA Consortium. (2017). Laser Interferometer Space Antenna. *arXiv:1702.00786*.
34. Einstein Telescope Collaboration. (2020). Einstein Telescope Design Report Update.
35. Cosmic Explorer Collaboration. (2021). Cosmic Explorer: The U.S. Contribution to Gravitational-Wave Astronomy.
36. DESI Collaboration. (2024). DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from Baryon Acoustic Oscillations.
37. Euclid Collaboration. (2024). Euclid: Early Data Release and Cosmology Forecasts. *Astronomy & Astrophysics*.
38. Vera C. Rubin Observatory. (2023). LSST Science Book, Version 2.0.

Nota: Todas las constantes fundamentales se unifican mediante $B = \hbar c G / c^3 = l_p^2$, conforme a la restriccion operacional $0 < B < \infty$, $[B] = L^2$, establecida en la Teoria ?.