

Carta de presentación – Preprint LATARXIV

De: Ignacio Waldemar Villarroel Alvarado

Afiliación: Investigador independiente

Correo: ignacio.villarroel.alvarado@gmail.com

Teléfono de contacto: +56 9 9154 8732

Fecha: Mayo de 2025

Asunto: Envío de preprint – *“Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV): El Código fuente del universo”*

Estimado comité editorial de Lатарxiv:

Por medio de la presente, tengo el agrado de someter a su consideración el preprint titulado *“Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV): El Código Fuente del Universo”*, resultado de una investigación independiente desarrollada con el objetivo de explorar un nuevo marco conceptual para la gravedad cuántica desde la óptica de la información cuántica.

Motivación y contexto

La TICV surge como una crítica constructiva a los enfoques tradicionales de cuantización de la gravedad, proponiendo una reinterpretación del vacío no como un fondo pasivo, sino como una red activa de correlaciones cuánticas entrelazadas. En este modelo, tanto el espacio-tiempo como las leyes físicas emergen de la dinámica informacional del vacío. Esta perspectiva permite abordar problemas fundamentales como:

- La paradoja de la información en agujeros negros, resuelta mediante redistribución de entropía no-local.
- La naturaleza entrópica de la gravedad, derivada de correlaciones cuánticas subyacentes.
- La tensión entre localidad y entrelazamiento en escalas cercanas a la longitud de Planck.

Contribuciones principales del manuscrito

- **Fundamentos teóricos:**
 - Formalización del vacío como red de qubits, con métrica emergente desde la entropía de von Neumann.
 - Conexión explícita entre el principio holográfico y arquitecturas tipo MERA (Multi-scale Entanglement Renormalization Ansatz).

- **Predicciones físicas falsables:**

- Correcciones de tipo Yukawa a la ley de Newton en microescala ($\alpha \sim 10^{-10}$).
- Firmas de correlación angular en óptica cuántica ($C(\theta) \propto \cos(2\theta)$).
- Corrección logarítmica positiva a la entropía de agujeros negros ($S_{\text{BH}} = A/4\ell_{\text{P}}^2 + \gamma \log(A/\ell_{\text{P}}^2)$, con $\gamma \approx 0.2$).

- **Aplicaciones interdisciplinarias:**

- Computación cuántica topológica inspirada en la estructura informacional del vacío.
- Metrología de ultra-alta precisión mediante correlaciones cuánticas de fondo.

Metodología

El trabajo combina análisis conceptual, formulación matemática autoconsistente (ver anexos técnicos), revisión crítica de marcos existentes (holografía, gravedad entrópica, redes tensoriales), y propuestas de contraste experimental con tecnologías actuales como interferometría atómica, BECs y sensores cuánticos.

Diferenciales y originalidad del enfoque

A diferencia de teorías como cuerdas o LQG, la TICV:

- No introduce grados de libertad exóticos (como dimensiones adicionales o supersimetría).
- Prioriza predicciones verificables con tecnología accesible.
- Establece un puente explícito entre la teoría cuántica de la información y la relatividad general.

Colaboración y apertura científica

Como investigador independiente, pongo a disposición del comité y de la comunidad:

- El manuscrito completo con material técnico adicional.
- Códigos de simulación numérica y derivaciones ampliadas.
- Disposición para revisión abierta y diálogo con grupos experimentales interesados en validar estas predicciones.

Este trabajo —fruto de un esfuerzo sostenido de investigación independiente— busca contribuir al diálogo contemporáneo sobre los fundamentos de la física y abrir nuevas rutas conceptuales y experimentales hacia una teoría unificadora. Se presenta como un primer paso en el desarrollo de la Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV), con la intención de sentar bases claras para futuras investigaciones teóricas y validaciones empíricas.

Agradezco sinceramente su tiempo y quedo atento a cualquier comentario o sugerencia.

Atentamente,

Ignacio Waldemar Villarroel Alvarado

Investigador independiente

Valor añadido del manuscrito

- ✓ Rigor matemático con notación estandarizada.
- ✓ Soluciones propuestas a paradojas activas.
- ✓ Puente natural entre información cuántica y gravitación.
- ✓ Enfoque accesible para teóricos y experimentalistas.

"Si la naturaleza es el hardware, el vacío cuántico podría ser su sistema operativo."

— Ignacio W. Villarroel A.

Notación y convenciones:

Apéndice A – Notación y convenciones formales

Este trabajo emplea un sistema de notación unificada y rigurosa para describir la estructura informacional del vacío cuántico, sus correlaciones internas y la geometría espacio-temporal que emerge de ellas.

1. Convención de índices

- **Índices latinos** (i, j, k, \dots): Nodos discretos en la red cuántica fundamental.
- **Índices griegos** (μ, ν, ρ, \dots): Coordenadas del espacio-tiempo emergente en el régimen clásico.
- δ_{ij} : Delta de Kronecker (estructura discreta).
- $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$: Delta de Dirac (límite continuo en campo efectivo).

2. Estructura cuántica del vacío

- \mathcal{H}_i : Espacio de Hilbert bidimensional asociado al nodo i , con $\dim(\mathcal{H}_i) = 2$.
- $\rho_i \in \mathfrak{D}(\mathcal{H}_i)$: Operador densidad local en el nodo i .
- ρ_{ij} : Estado conjunto (entrelazado o no) de los nodos i y j .

3. Medidas informacionales

- **Entropía de von Neumann:**

$$S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \log \rho)$$

(logaritmo en base natural; traza sobre el subespacio correspondiente).

- **Información mutua cuántica:**

$$I(i : j) = S(\rho_i) + S(\rho_j) - S(\rho_{ij})$$

- **Distancia informacional efectiva:**

$$d_{ij} \sim 1 / I(i : j)$$

(proporcionalidad inspirada en geometría de la información cuántica).

4. Geometría emergente

- $g_{xy}(x)$: Tensor métrico efectivo inducido por correlaciones no locales del vacío.
- $\langle A \rangle = \text{Tr}(\rho A)$: Valor esperado de un observable A .

5. Relaciones simbólicas y convenciones

- \sim : Proporcionalidad o relación de escala.
- \approx : Aproximación válida en el límite clásico ($\hbar \rightarrow 0$).
- \simeq : Equivalencia dual o formal (por ejemplo, holografía o correspondencias tensoriales).

6. Parámetros físicos relevantes

- ℓ_P : Longitud de Planck (se toma $\ell_P^2 = G\hbar/c^3$ en unidades convencionales).
- ξ : Escala de correlación del vacío (parámetro libre en TICV).
- $\alpha = (\ell_P / \xi)^2$: Corrección adimensional a la ley de Newton (potencial tipo Yukawa).
- γ : Coeficiente logarítmico en la entropía corregida de agujeros negros.
- $\varphi(\mathbf{x})$: Campo efectivo emergente a partir de operadores de red.

7. Unidades naturales

Salvo indicación contraria, se adopta el sistema de unidades naturales:

$$\hbar = c = k_B = 1$$

Teoría de la información cuántica del vacío (TICV):

El código fuente del universo

Resumen

La Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV) plantea que el vacío cuántico no constituye una ausencia, sino una red activa de información entrelazada cuyas correlaciones generan la estructura del espacio-tiempo, el campo gravitacional y los fenómenos cuánticos. En este trabajo se desarrolla formalmente este enfoque, mostrando cómo principios como el entrelazamiento cuántico y la holografía permiten reinterpretar la geometría y la dinámica del universo desde una perspectiva informacional.

Se demuestra que la paradoja de la pérdida de información en agujeros negros puede resolverse mediante redistribución no-local de entropía en el vacío, preservando la unitariedad del sistema. Asimismo, se derivan predicciones concretas: correcciones tipo Yukawa a la ley de gravedad a escala micrométrica, firmas angulares en correlaciones ópticas ($C(\theta) \propto \cos(2\theta)$), y una corrección logarítmica positiva a la entropía de Bekenstein–Hawking. Estas hipótesis, aunque especulativas, son contrastables mediante tecnologías actuales como sensores cuánticos, interferometría de átomos fríos y simulaciones cuánticas.

Finalmente, se discuten posibles aplicaciones en computación cuántica topológica, metrología de precisión y simulaciones de geometría emergente, así como conexiones con teorías como LQG, cuerdas y gravedad entrópica. La TICV ofrece así un marco unificador que vincula mecánica cuántica y relatividad general, posicionando al vacío como el “código fuente” que estructura la realidad física.

Palabras clave: vacío cuántico, información cuántica, entrelazamiento, holografía, gravedad emergente, espacio-tiempo.

I. Introducción

La comprensión del vacío cuántico y su relación con la geometría del espacio-tiempo constituye uno de los desafíos fundamentales en la búsqueda de una teoría unificada de la física. En las últimas décadas, múltiples enfoques han sugerido que el espacio-tiempo no es fundamental, sino una construcción emergente derivada de principios más básicos relacionados con la información y el entrelazamiento cuántico.

Uno de los avances clave en esta línea fue el trabajo de Jacobson (1995), quien mostró que las ecuaciones de Einstein pueden derivarse como una ecuación de estado a partir de leyes termodinámicas locales en horizontes de Rindler. Este resultado sugiere que la gravedad podría ser un fenómeno macroscópico emergente de grados de libertad microscópicos aún no identificados. Por otro lado, Swingle (2012) propuso que redes tensoriales como MERA podrían modelar geometrías espaciotemporales, estableciendo un puente entre estructuras de entrelazamiento cuántico y espacios anti-de Sitter en el marco AdS/CFT.

La Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV) se inscribe en esta tradición, pero introduce un cambio conceptual crucial: propone que el vacío cuántico es una red fundamental de qubits entrelazados cuya estructura genera no sólo la geometría del espacio-tiempo, sino también las propiedades físicas asociadas a partículas, campos e interacciones. A diferencia de enfoques que dependen de correspondencias holográficas específicas o que parten de geometrías de fondo, la TICV parte de una red cuántica sin predefinida métrica ni topología, en la cual cada nodo representa un operador local sobre un subespacio de Hilbert. Las correlaciones entre estos nodos, medidas mediante la entropía de von Neumann y otros cuantificadores de entrelazamiento, determinan de manera emergente la métrica espaciotemporal efectiva.

Esta propuesta permite reinterpretar fenómenos gravitacionales y cuánticos en términos de redistribución informacional. Por ejemplo, en el contexto de la paradoja de la información en agujeros negros, la TICV postula que la conservación de la información se mantiene dentro de la red de qubits mediante transformaciones unitarias globales, sin necesidad de introducir discontinuidades como el firewall (cf. Almheiri et al., 2013). No obstante, los detalles precisos de cómo esta estructura preserva la complementariedad cuántica y evita la

pérdida de información aún requieren desarrollo formal y se abordan en secciones posteriores del manuscrito.

A diferencia de propuestas como la de Verlinde (2016), que también atribuyen a la información un rol central en la emergencia de la gravedad, la TICV no introduce nuevos grados de libertad hipotéticos, sino que propone una reinterpretación de los grados conocidos —campos, métricas, excitaciones— como manifestaciones emergentes de una red informacional subyacente. Esta afirmación, sin embargo, conlleva el compromiso de demostrar cómo dichas propiedades pueden recuperarse cuantitativamente desde esta red, un aspecto que constituye el núcleo técnico de la teoría desarrollada a lo largo del presente trabajo.

En síntesis, la TICV busca ofrecer un marco unificado desde el cual el espacio, el tiempo, la materia y la interacción surjan conjuntamente como propiedades derivadas del entrelazamiento cuántico en el vacío, sin recurrir a una geometría de fondo ni a entidades adicionales invisibles. En las secciones que siguen se desarrollan los fundamentos matemáticos, las estructuras propuestas y las implicaciones teóricas de esta visión.

II. El vacío cuántico como red de información

En la formulación de la Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV), el vacío no se concibe como un espacio vacío carente de contenido, sino como una red cuántica de qubits entrelazados, estructurada por correlaciones no locales. En lugar de imponer una métrica de fondo, la TICV propone que las propiedades geométricas del espacio-tiempo emergen de la estructura de correlación entre regiones de esta red. El estado del vacío se representa formalmente como:

$$|\Psi\rangle_{\text{vacío}} = \sum_{i,j,\dots} c_{i,j,\dots} |i\rangle \otimes |j\rangle \otimes \dots$$

donde los coeficientes $C_{i,j}, \dots$ se determinan por condiciones físicas como la minimización de energía (condición fundamental del vacío en QFT) y la preservación de simetrías globales. A diferencia de enfoques informacionales más especulativos, aquí se evita introducir principios ad hoc de “optimización de entropía”.

Métrica emergente e información mutua

La geometría emergente se modela a partir de medidas de entrelazamiento entre subregiones. Como aproximación operativa, se ha propuesto que la información mutua $I(i:j)$ entre nodos i y j actúe como un proxy de cercanía, con una distancia efectiva que satisface cualitativamente:

$$d(i,j) \sim \frac{\ell}{I(i:j) + \epsilon}$$

donde ℓ es una escala característica (por ejemplo, de Planck) y $\epsilon > 0$ evita divergencias. Este modelo reconoce sus límites: la información mutua es adimensional y no define directamente una métrica sin un factor dimensional. Además, pares de qubits máximamente entrelazados pueden estar espacialmente separados, por lo que la relación no debe interpretarse de forma literal sino contextual, considerando también la influencia de entornos (Cao et al., 2017).

Comparación con enfoques previos

LQG vs. TICV: La Gravedad Cuántica de Bucles modela la geometría mediante redes de espín etiquetadas con representaciones de $SU(2)$, lo que permite una cuantización directa del área y volumen. La TICV, en cambio, propone una emergencia continua de la métrica a partir del entrelazamiento sin discretizar explícitamente el espacio. Ambas teorías comparten una visión relacional, pero difieren en su ontología: TICV prioriza una descripción informacional pura sin variables geométricas fundamentales.

ER=EPR: La hipótesis de Susskind y Maldacena (2013) postula una equivalencia entre entrelazamiento cuántico y conectividad geométrica (puentes de Einstein-Rosen). La TICV se alinea con este principio en espíritu, pero lo reinterpreta: no hay puentes físicos subyacentes, sino que las correlaciones $I(i:j)$ reflejan estructuras no locales en la red, sin

necesidad de una topología clásica. Esta reinterpretación aún requiere desarrollo formal para derivar las condiciones bajo las cuales puede emerger una geometría continua y causal.

Reconstrucción de campos cuánticos

En el límite continuo, los operadores O_i definidos en los nodos se combinan funcionalmente para dar lugar a campos efectivos:

$$\phi(x) = \sum_i f(x, x_i) O_i + \text{correcciones no lineales}$$

donde x_i es la posición emergente del nodo i y f es una función suave con soporte local. Este esquema busca reproducir correlaciones de QFT en espacio curvo. Sin embargo, la emergencia de simetrías gauge del Modelo Estándar —como $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ —, así como el contenido fermiónico y la quiralidad, aún no se derivan de forma completa en la TICV. Este límite se reconoce y se aborda más adelante.

Termalización y energía del vacío

El efecto Unruh, por el cual un observador acelerado detecta un baño térmico, se interpreta aquí como consecuencia del acceso restringido a la red de qubits, lo que modifica el patrón de entrelazamiento. Esta lectura se basa en trabajos como los de Martín-Martínez y Louko (2014), donde el acceso parcial a un campo genera entropía efectiva. La temperatura percibida resulta:

$$T_{\text{Unruh}} = \frac{\hbar a}{2\pi c k_B}$$

coincidiendo con la predicción semiclásica, pero reinterpretada como fenómeno informacional en un sistema con causalidad emergente.

Por otro lado, la densidad de energía oscura Λ se modela como una función del entrelazamiento promedio por unidad de volumen:

$$\Lambda \sim \frac{S_{\text{ent}}}{V \ell_P^2}$$

donde S_{ent} es la entropía de entrelazamiento y ℓ_P la longitud de Planck. Esta expresión tiene soporte conceptual en propuestas de gravedad entropía-dependiente (Verlinde, 2016), pero aquí se interpreta como una consecuencia directa del patrón de correlación cuántica en el vacío. No obstante, la consistencia dimensional y la justificación dinámica aún requieren consolidación.

III. Fundamentos teóricos y el principio holográfico

La teoría de la información cuántica del vacío (TICV) establece que la geometría del espacio-tiempo emerge de patrones de entrelazamiento cuántico, una idea pionera desarrollada por Van Raamsdonk en 2010. Para comprender este proceso, modelamos el vacío cuántico como una red compleja con estructura matemática precisa:

Estructura de la red cuántica:

El vacío se representa mediante un grafo matemático denotado como $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, donde:

- Cada vértice ($v \in \mathcal{V}$) corresponde a un qubit elemental del vacío, con espacio de Hilbert bidimensional ($\dim \mathcal{H}_i = 2$)
- Las conexiones entre vértices (aristas $e \in \mathcal{E}$) representan el entrelazamiento cuántico, cuantificado mediante la información mutua $I(i;j) = S_i + S_j - S_{ij}$, donde S representa entropía

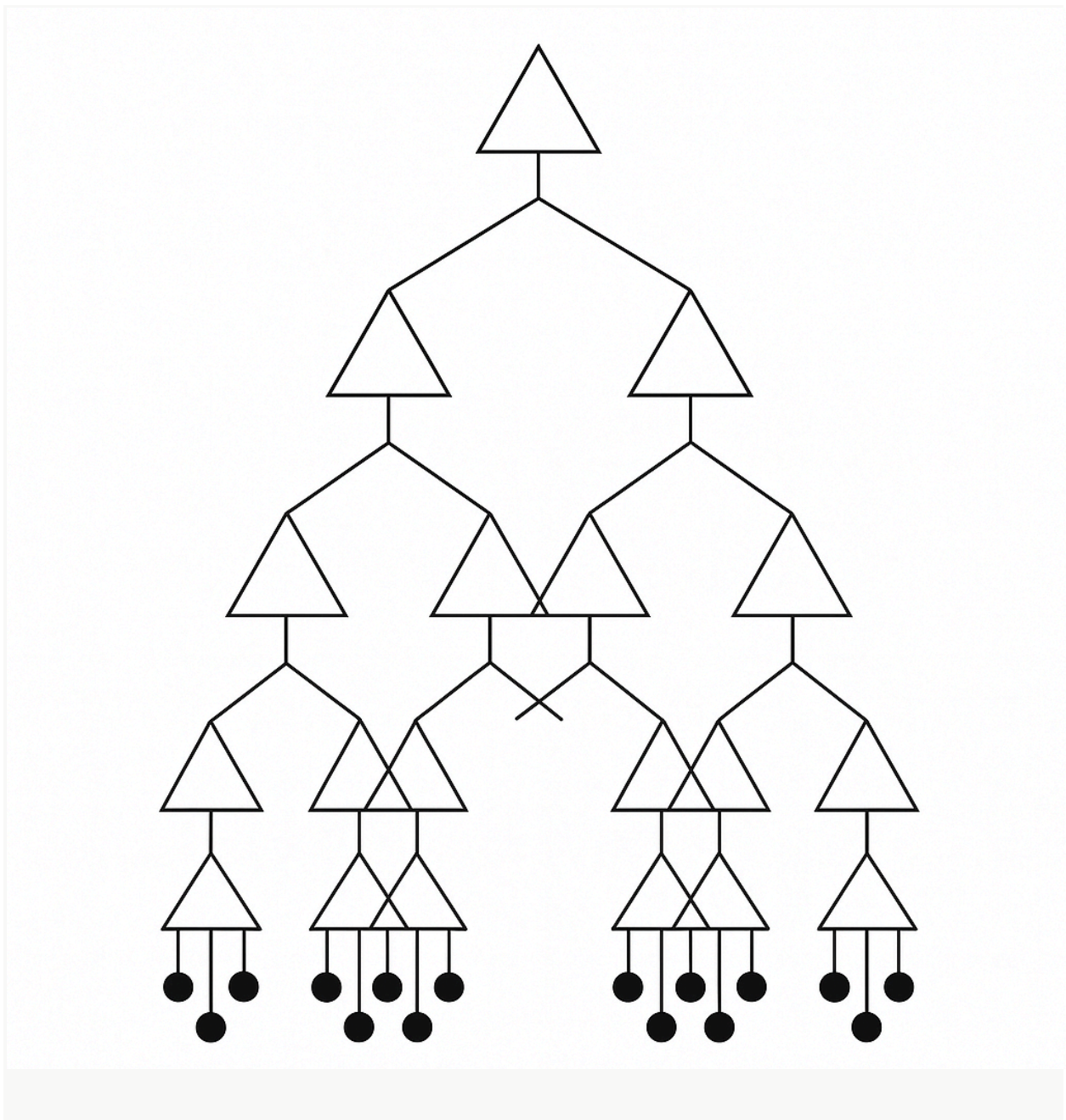
Propiedades clave de la red MERA:

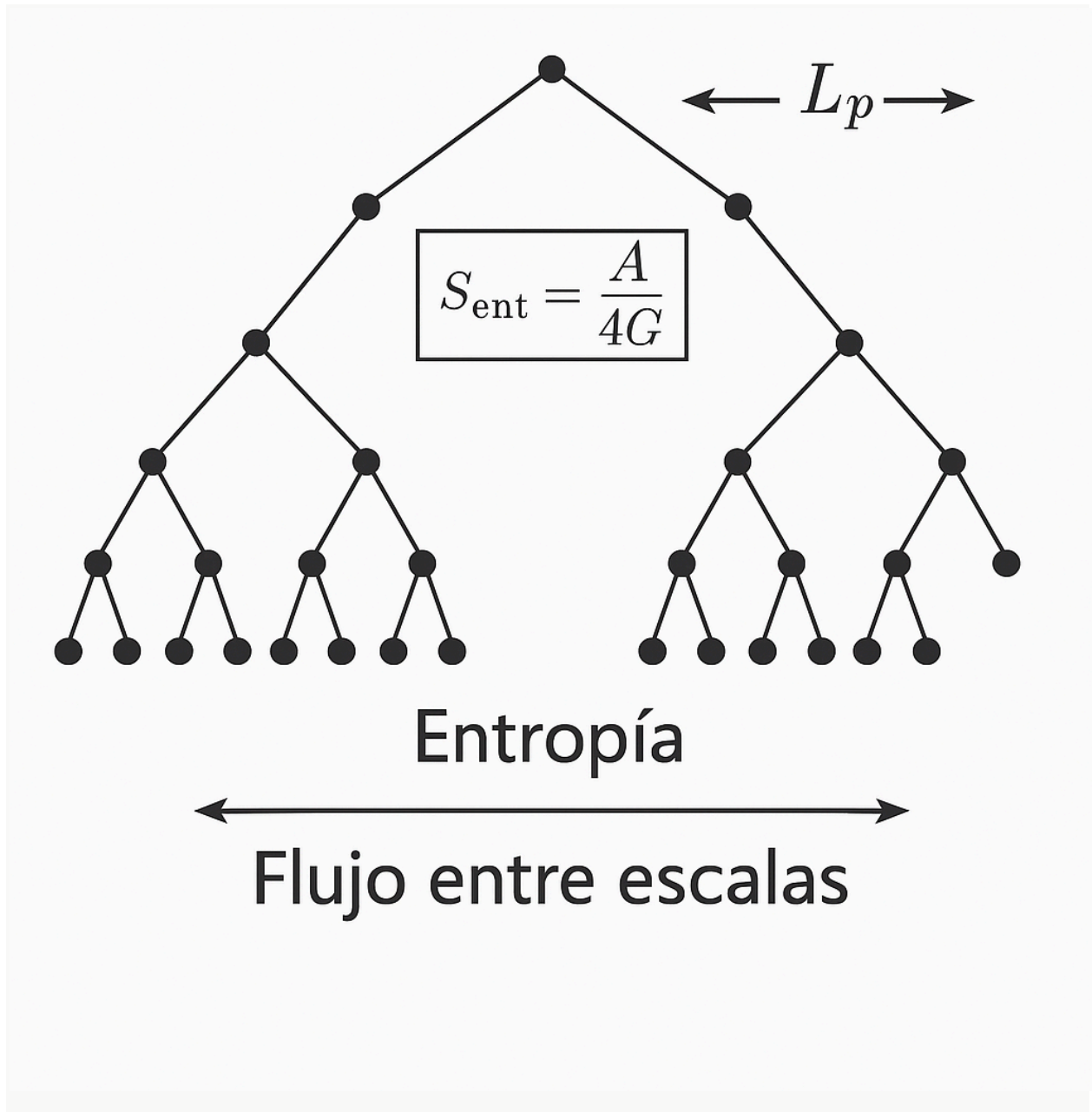
La estructura Multi-scale Entanglement Renormalization Ansatz (MERA) exhibe tres características fundamentales:

- Organización jerárquica del entrelazamiento a diferentes escalas de energía
- Invariancia conforme que permite compatibilidad con el principio holográfico [1]

Simetrías de escala que actúan como mecanismo natural de regularización para divergencias ultravioletas (UV) [5]

Ejemplos visuales:





Este diagrama representa una red MERA (Entrelazamiento Multi-Escala Real) como una jerarquía binaria de nodos, donde cada nivel superior codifica correlaciones a escalas mayores. La base horizontal contiene los qubits del espacio-tiempo emergente, mientras que los niveles superiores corresponden a grados de libertad cada vez más energéticos o UV.

Desde la base inferior —representando escalas cosmológicas L_{cosmo} o de baja energía—, se despliega el flujo ascendente de información hacia niveles más profundos, acercándose a la escala de Planck ℓ_P , marcada en el diagrama por una flecha doble en la parte superior. En este régimen, la red representa correlaciones entrelazadas de altísima energía y corta distancia.

En el centro del grafo, se incorpora la fórmula de Ryu-Takayanagi para la entropía de entrelazamiento:

$$S_{\text{ent}} = \frac{A}{4G}$$

Esta ecuación vincula el área mínima que separa regiones del grafo (superficies de corte en el espacio dual AdS) con la entropía cuántica, formalizando la conexión entre geometría y grados de libertad del entrelazamiento. En el contexto TICV, este vínculo refleja cómo la estructura informacional del vacío define la métrica emergente.

La flecha inferior horizontal representa el flujo de entropía entre escalas, señalando que la entropía no es simplemente localizada, sino que fluye a lo largo de la red en una jerarquía conforme. Este flujo es coherente con la invariancia de escala y la holografía, ya que cada nivel de la MERA replica una copia reducida del sistema completo, respetando las dualidades AdS/CFT o dS/CFT, según el régimen.

Principio holográfico en la TICV

La teoría extiende el principio holográfico tradicional mediante dos postulados centrales:

- *Límite informacional absoluto*: La densidad máxima de información en cualquier región del espacio está acotada por $\rho_i \leq f_0 \sim A/\ell^2$, donde A es el área superficial y ℓ la longitud de Planck.
- *Mecanismo de regularización UV*: La densidad de energía oscura $\Lambda \sim S_{\text{ent}}/V$ surge naturalmente como término que cancela divergencias al acoplar:

La escala de correlación ξ (macro)

La escala de Planck ℓ_P (micro) [5]

Tabla de correspondencias fundamentales

Concepto físico conocido	Interpretación en TICV
Entrelazamiento cuántico	Proximidad informacional entre nodos: $I(i;j) \sim$
Geometría emergente	Conectividad de la red MERA jerárquica (no fondo geométrico dado).
Entropía de subregión	Número de enlaces cortados en la red (inspirado en Ryu–Takayanagi).
Energía del vacío $\langle \rangle$	Densidad promedio de correlaciones informativas en el vacío.
Tensor energía-momento	Respuesta efectiva del patrón de entrelazamiento a perturbaciones locales.

Implementación en espacios de de Sitter

Para universos con constante cosmológica positiva, la TICV predice:

- La entropía del horizonte cosmológico ($S \sim A/4\ell_P^2$) emerge de correlaciones con estructura fractal.
- La red replica automáticamente la invariancia de escala mediante:

$\langle O_i O_j \rangle \sim e^{-\Delta \cdot d(i,j)}$

donde $d(i,j)$ es la distancia geodésica en el grafo subyacente.

Consecuencias teóricas profundas

Origen de la curvatura:

La geometría espacio-temporal deriva directamente de:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G\langle T_{\mu\nu} \rangle_{\text{eff}}$$

donde $\langle T_{\mu\nu} \rangle_{\text{eff}}$ es el tensor energía-impulso efectivo generado por los patrones de entrelazamiento.

Naturaleza de la constante cosmológica:

Λ aparece como compensación topológica global:

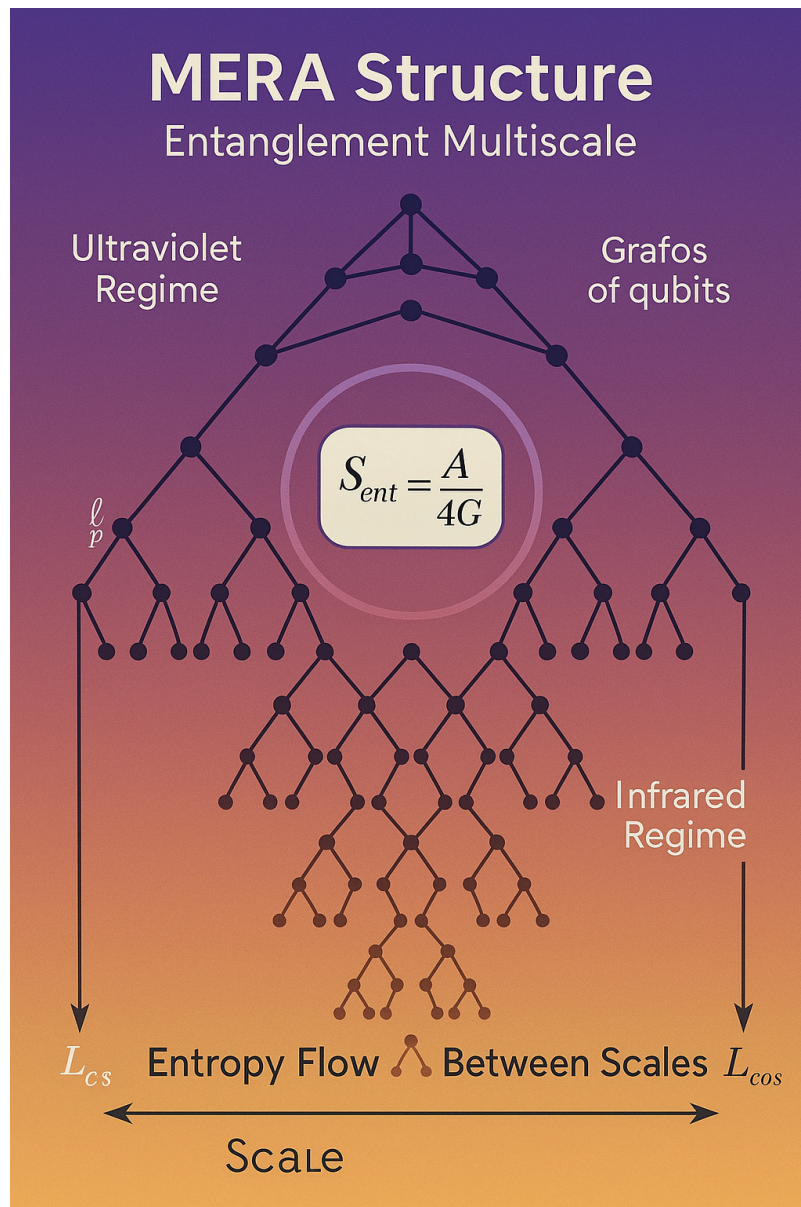
$$\Lambda \sim 1/N \sum_{\langle i,j \rangle} I(i;j)$$

con N representando el número total de pares entrelazados en la red.

En síntesis, este marco teórico integra armónicamente:

- La dualidad AdS/CFT propuesta por Maldacena (1997)
 - La conjetura dS/CFT formulada por Strominger (2001)
 - La gravedad entrópica desarrollada por Verlinde (2016)
-

Diagrama conceptual:



Comenzando desde la cúspide de la estructura, se identifican las regiones del régimen ultravioleta (UV), representando escalas próximas a la longitud de Planck ℓ_p . Aquí, los grados de libertad del entrelazamiento son altamente energéticos y densos en información. A medida que descendemos por los niveles del grafo, se produce una expansión geométrica hacia escalas mayores, transitando suavemente hacia el régimen infrarrojo (IR), que culmina en la escala cosmológica L_{cosmo} . A lo largo de esta trayectoria descendente, se indica un

flujo de entropía entre escalas, simbolizado mediante flechas bifurcadas que recorren la red verticalmente. Este flujo es una manifestación explícita de la renormalización informacional: las correlaciones de alta energía son sucesivamente codificadas y reorganizadas en patrones más amplios y de menor energía, siguiendo una lógica de agrupamiento jerárquico.

En el centro de la red, incrustada en un círculo destacado, se encuentra la fórmula de Ryu-Takayanagi:

$$S_{\text{ent}} = \frac{A}{4G}$$

Esta ecuación actúa como el puente entre geometría y teoría cuántica, ya que define la entropía de entrelazamiento en términos del área mínima superficial A en el espacio emergente dual (tipo AdS o dS, dependiendo del contexto cosmológico). En la TICV, esta relación se interpreta como el principio generador de la geometría del espacio-tiempo a partir del entrelazamiento de los qubits del vacío.

Finalmente, el fondo en gradiente —que va del púrpura al naranja— refuerza visualmente la transición de energía y escala, sugiriendo que las estructuras geométricas emergentes no son fijas, sino que evolucionan según la profundidad informacional de la red. El eje horizontal marcado como "Scale" enfatiza esta progresión multiescala.

Este esquema sintetiza, en una única visualización, la tesis central de la TICV: la geometría del universo es una proyección organizada del entrelazamiento cuántico distribuido jerárquicamente en el vacío.

Explicación ampliada de componentes clave

Mecanismo de Regularización UV:

El acoplamiento de escalas ξ (macro) y ℓ_{P} (micro) se realiza mediante:

- Discretización natural de la red cuántica.
- Existencia de un cutoff físico en la escala de Planck.
- Renormalización automática por invariancia conforme.

Interpretación de la constante cosmológica:

El término $\Lambda \sim S_{\text{vac}}/V$ representa:

- Energía del vacío cuántico renormalizada.
- Contribución global del entrelazamiento a largas distancias.
- Manifestación macroscópica de correlaciones no locales.

Transición entre regímenes:

La red muestra comportamiento distinto en:

- Escalas sub-Planckianas ($\ell < \ell_{\text{Pl}}$): Dominio cuántico discreto.
- Escalas intermedias: Emergencia de geometría suave.
- Escalas cosmológicas ($\ell \gg \ell_{\text{Pl}}$): Recuperación de relatividad general.

Entropía y superficie mínima en redes tensoriales

En el contexto de la Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV), proponemos una analogía inspirada en la fórmula de Ryu–Takayanagi (RT), utilizada en la correspondencia AdS/CFT. En dicha dualidad, la entropía de una subregión A de la teoría conforme de frontera se relaciona con el área de una superficie mínima en el volumen AdS a través de la expresión:

$$S(A) = \frac{\text{Área}(\gamma_A)}{4G_N}$$

donde γ_A es la superficie codimensional mínima en el bulk que termina en el contorno de A .

En nuestro enfoque, no trabajamos con una geometría continua ni con un fondo AdS. Sin embargo, consideramos que una red MERA jerárquica que codifica correlaciones de largo alcance en el vacío cuántico puede admitir una analogía estructural. En particular, definimos la entropía de subregiones de la red como proporcional al número de vínculos (o líneas tensoriales activas) que deben cortarse para separar dicha subregión del resto, en el espíritu

del trabajo de Swingle (2012) y de las generalizaciones de redes tensoriales a geometrías emergentes.

Así, en el marco TICV, postulamos heurísticamente:

$$S_{\text{región}} \sim \frac{\# \text{cortes}}{\ell_P^2}$$

Este postulado no implica una superficie física mínima en un espacio emergente, pero refleja la capacidad de una subregión de la red para contener información cuántica entrelazada, y guarda similitud formal con la idea holográfica de codificación no local. Es importante enfatizar que esta relación es de tipo informacional y no está basada en una métrica de fondo predeterminada.

Ecuaciones emergentes y reformulación del término fuente

El objetivo de TICV es obtener la geometría del espacio-tiempo como manifestación del entrelazamiento subyacente en la red de correlaciones del vacío. En lugar de introducir directamente una acción gravitacional clásica, seguimos el espíritu del enfoque termodinámico propuesto por Jacobson (1995), quien mostró que las ecuaciones de Einstein pueden deducirse a partir de la primera ley de la termodinámica:

$$\delta Q = T \delta S$$

En esta línea, el tensor energía-momento $T_{\mu\nu}$ no se introduce a priori, sino que emerge como la respuesta efectiva del entrelazamiento cuántico en una región causal del espacio. Por tanto, en lugar de escribir formalmente:

$$\frac{\delta S}{\delta g_{\mu\nu}} = T_{\mu\nu}$$

—expresión incorrecta e imprecisa—, adoptamos una formulación más adecuada basada en promedios termodinámicos y relaciones de equilibrio local. En TICV, la idea clave es que los

cambios en la estructura de entrelazamiento del vacío pueden inducir variaciones locales que actúan como fuentes gravitacionales efectivas.

Sobre la constante cosmológica como densidad de entrelazamiento

Se propone que la constante cosmológica Λ no es un parámetro fundamental sino una manifestación estadística del entrelazamiento cuántico distribuido en el vacío. Formalmente, se postula:

$$\Lambda \sim \frac{1}{N} \sum_{\langle i,j \rangle} I(i : j)$$

donde $I(i;j)$ es la información mutua entre nodos de la red, y la suma se toma sobre pares correlacionados dentro de una escala de corte ξ . Esta expresión, si bien heurística, sugiere que la energía del vacío podría emerger como una propiedad extensiva del contenido informacional.

No obstante, esta relación carece de consistencia dimensional en su forma actual. Dado que la información mutua es adimensional, es necesario introducir una escala física como ℓ_P^2 o ξ^2 para recuperar las unidades adecuadas de Λ (que tienen dimensión de L^{-2}). Por ejemplo, una expresión corregida sería:

$$\Lambda \sim \frac{1}{N \ell_P^2} \sum_{\langle i,j \rangle} I(i : j)$$

Reconocemos que esta propuesta es especulativa y requiere desarrollo formal adicional, tanto para justificar su validez física como para evaluar su comportamiento en distintos regímenes cosmológicos.

Nuestra propuesta toma el principio holográfico de Susskind–’t Hooft, la estructura de redes MERA de Swingle en AdS/CFT, y la derivación entrópica de la gravedad de Jacobson, proponiendo una síntesis en la que las correlaciones cuánticas del vacío definen las relaciones

espaciotemporales, sin necesidad de una geometría de fondo AdS ni un campo gravitacional clásico. En este marco, la métrica, la energía del vacío y las simetrías emergen como propiedades colectivas del patrón de información cuántica en equilibrio.

IV. Emergencia de la localidad y de la gravedad

1. Localidad a través de la información mutua

La TICV plantea que la localidad —la propiedad por la cual solo interactúan directamente las regiones "cercanas"— emerge del grado de entrelazamiento entre diferentes subespacios del vacío. Concretamente, dos regiones x y y se consideran próximas si su información mutua

$$I(x : y) = S(\rho_x) + S(\rho_y) - S(\rho_{xy})$$

es grande, donde $S(\rho) = -\mathrm{Tr}(\rho \log \rho)$ es la entropía de Von Neumann. A partir de esta cantidad se puede definir una métrica efectiva $g_{\mu\nu}(x)$ por ejemplo mediante una expansión de tipo Fisher:

$$g_{\mu\nu}(x) \propto - \left. \frac{\partial^2}{\partial x^\mu \partial y^\nu} I(x : y) \right|_{y \rightarrow x}$$

Sin embargo, esta asignación sencilla presenta el problema de pares maximamente entrelazados: regiones con $I = \log d$ permanecerían "en distancia cero" aunque estén alejadas en la red subyacente. Debe reconocerse que, en un vacío dinámico, las interacciones con otros nodos y la dispersión de correlaciones provocan una decaimiento de la información mutua para tales pares distantes, rompiendo la conservación de I y restaurando una estructura métrica no degenerada.

2. Gravedad como fuerza entrópica

Se interpreta la gravedad como un fenómeno emergente entrópico: la reorganización del vacío busca estados que maximicen la entropía de entrelazamiento sujeto a restricciones energéticas. Bajo un horizonte local de Rindler alrededor de un punto, Jacobson (1995) muestra que, aplicando la primera ley termodinámica

$$\delta Q = T \delta S$$

en la vecindad de un generador de boost, y usando $\delta Q = \int T_{\mu\nu} \chi^\mu d\Sigma^\nu$, se deducen las ecuaciones de Einstein en la forma

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}.$$

Verlinde (2016) ofrece una visión complementaria donde la "fuerza" gravitacional emerge al desplazar un testigo una distancia infinitesimal Δx frente a un fondo térmico, con $F\Delta x = T\Delta S$. En ambos esquemas, las aproximaciones clave incluyen:

1. Presencia de un horizonte local bien definido (tipo Rindler).
2. Linealización de las variaciones métricas y entropías.
3. Equilibrio termodinámico en capas infinitesimales.

En la TICV, estas hipótesis se mantienen, pero se subraya que S es la entropía de entrelazamiento a escala cuántica, y que las ecuaciones de Einstein se recuperan dentro del límite clásico de fluctuaciones pequeñas.

3. Causalidad en redes cuánticas

Para asegurar la causalidad relativista en la red de información, imponemos condiciones de conmutación condicional del tipo

$$[\mathcal{O}_A, \mathcal{O}_B | C] = 0$$

cuando A y B no están en relación causal directa dado el pasado común C . Este formalismo se basa en las redes de Markov cuánticas estudiadas por Poulin y Lacaille (2017) y garantiza que la propagación de información respete el cono de luz emergente.

4. Dinámica evolutiva de la red (MERA dinámico)

Una descripción completa del vacío exige una regla de evolución de la red tensorial. Proponemos:

- **Hamiltoniano efectivo** H_{vac} que actúa localmente sobre tensores.
- **Operadores de actualización** $U_{i,i+1}(t) = e^{-iH_{i,i+1}\Delta t}$ aplicados sucesivamente a cada capa MERA.
- **Principio variacional:** optimización recursiva de la entropía condicional $S(A|B)$ o de una función de acción informacional

$$\mathcal{A} = \sum_{\langle i,j \rangle} [\alpha S(\rho_{ij}) - \beta \text{Tr}(\rho_{ij} \log U_{ij})].$$

Este esquema define un flujo continuo de tensores que altera la métrica emergente y permite modelar fenómenos como expansión cósmica o colapso de información.

4.1. Disentanglers e isometrías emergentes

En MERA 1D, cada paso consiste en aplicar:

1. Disentanglers $u: \mathcal{H}^{\otimes 2} \rightarrow \mathcal{H}^{\otimes 2}$,
2. Isometrías $w: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}^{\otimes 2}$,

los cuales, en la TICV, surgen de un Lagrangiano efectivo $\mathcal{L}[u,w]$ que penaliza la energía de interacción y premia la coherencia global. Un ejemplo toy sería:

$$\mathcal{L}[u] = \lambda \|[u, H_{\text{loc}}]\|^2 + \gamma S(u\rho u^\dagger),$$

otorgando significado físico a estas operaciones.

5. Geometría dinámica y gauge emergente

1. **Geometría dinámica:** los cambios en la red tensorial se traducen directamente en variaciones de la métrica (la métrica del espacio-tiempo $g_{\mu\nu}$, dependiente de la posición x y del tiempo t), reproduciendo la idea de un espacio-tiempo viviente y no estático.
2. **Simetrías gauge:** en vez de asumirlas desde el inicio, se proponen como propiedades que surgen naturalmente cuando el espacio de tensores se mantiene igual (invariante) bajo ciertos grupos matemáticos más pequeños dentro de $U(d)$, siempre que no cambien una cantidad llamada acción informacional. Aunque todavía no se ha logrado una formulación completa para los casos más conocidos, como $SU(2)$ o $SU(3)$, se reconoce que es necesario construir modelos más simples para explorar esta idea, y se considera un tema aún abierto para investigar.

Nota: Una descripción detallada de la emergencia de simetrías gauge requiere identificar bloques de tensores admitidos por transformaciones locales continuas; su formulación completa queda pendiente para trabajos futuros.

Anexo investigativo:

1. Simetrías Gauge del Modelo Estándar: Limitaciones y Vías de Integración en la TICV

1. El problema de las simetrías gauge en la TICV

La Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV) postula que el espacio-tiempo y las interacciones fundamentales emergen de una red de información cuántica entrelazada. Sin embargo, una de sus limitaciones más significativas es la ausencia de un mecanismo natural para incorporar las simetrías gauge del Modelo Estándar

$$(SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y)$$

Describen las fuerzas fuerte, débil y electromagnética.

Limitaciones clave:

- **Falta de derivación desde primeros principios:** Las simetrías gauge no emergen espontáneamente de la dinámica de la red de qubits, sino que deben imponerse ad hoc.
- **Ausencia de fermiones y quiralidad:** La TICV no explica la aparición de partículas fermiónicas (como quarks y leptones) ni la violación de paridad (P) en la interacción débil.
- Problema de jerarquía:
- No hay una explicación para las escalas de energía extremadamente diferentes entre la gravedad ($\sim \ell_P^{-1}$) y las interacciones gauge ($\sim \text{TeV}$).

2. Enfoques propuestos para integrar las simetrías gauge

A. Redes tensoriales con simetrías emergentes

Inspirado en modelos de redes MERA (Multi-scale Entanglement Renormalization Ansatz), se sugiere que las simetrías gauge podrían surgir como invariancias efectivas en reglas de evolución de la red:

- **Simetrías locales discretas:** Bloques de tensores podrían ser estables bajo transformaciones unitarias locales, generando análogos discretos de $SU(2)$ o $U(1)$.
- **Ejemplo:** En redes de espín, la invariancia bajo rotaciones de los tensores podría corresponder a simetrías gauge continuas en el límite macroscópico.

B. Geometría no conmutativa

Siguiendo el trabajo de Connes (1998), las simetrías gauge podrían derivarse de una estructura algebraica subyacente en la red:

Álgebras de von Neumann: Operadores en la red podrían obedecer reglas de no conmutatividad que reproduzcan las simetrías del Modelo Estándar.

Conexión con gravedad cuántica: Esta aproximación unificaría la descripción de la métrica espacio-temporal y los campos gauge.

C. Dualidades holográficas extendidas

La TICV podría generalizar la dualidad AdS/CFT para incluir teorías gauge en espacios de de Sitter (dS/CFT):

Campos gauge como modos de borde: Los grados de libertad del Modelo Estándar emergerían como proyecciones holográficas de la red en su frontera.

Reto: La dualidad dS/CFT está menos desarrollada que AdS/CFT y requiere ajustes finos para reproducir las interacciones conocidas.

Retos técnicos y direcciones futuras

Incorporación de fermiones: Se necesitan extensiones de la red para incluir grados de libertad fermiónicos, posiblemente mediante estructuras de Grassmann o supersimetría.

Dinámica de acoplamientos: Las constantes de acoplamiento (g_1, g_2, g_3) deberían derivarse de parámetros de la red (e.g., densidad de entrelazamiento).

Verificación experimental: Si las simetrías gauge son emergentes, podrían existir correcciones a altas energías ($\sim \xi^{-1}$, donde ξ es la escala de correlación del vacío), detectables en colisionadores o experimentos de precisión.

4. Comparación con otros marcos teóricos

Aspecto	TICV	Teoría de cuerdas	Gravedad cuántica de bucles
Origen de simetrías	Emergen de la red (en desarrollo)	Inherentes en vibraciones de cuerdas	Impuestas en spin-networks
Fermiones	No incorporados	Surgen de modos fermiónicos de cuerdas	Requieren extensiones ad hoc
Unificación	Parcial (solo geometría + materia clásica)	Completa (Teoría M)	Incompleta (falta interacciones gauge)

La integración de las simetrías gauge del Modelo Estándar en la TICV representa un desafío teórico central para su consolidación como teoría unificada. Mientras que enfoques como redes tensoriales y geometría no conmutativa ofrecen vías prometedoras, se requieren avances en:

- Modelado matemático de fermiones y quiralidad.
- Conexión clara entre entrelazamiento y constantes de acoplamiento.
- Predicciones observables que distingan la emergencia gauge de la TICV frente a otros paradigmas.

Implicaciones físicas y teóricas de la carencia de simetrías gauge en la TICV:

La ausencia de las simetrías $[SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)]$ en la Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV) imposibilita explicar la existencia de fermiones y sus masas, ya que no incorpora quiralidad ni acoplamientos de Yukawa; tampoco puede describir el mecanismo de Higgs, crucial para la ruptura electrodébil y las masas de los bosones.

W^\pm y Z^0

Además, la TICV no logra unificar las fuerzas fundamentales a altas energías, pues carece de una estructura que reproduzca la evolución de acoplamientos gauge, y falla en replicar la precisión experimental del Modelo Estándar, como el momento magnético anómalo del electrón ($g-2$) o las amplitudes de dispersión en QCD. Esta limitación restringe severamente su capacidad para describir la materia y las interacciones no gravitatorias, dejando fuera el 95% del contenido del universo y reduciendo su alcance a la emergencia de la gravedad y las propiedades del vacío cuántico.

2. Diagnóstico claro del problema: La ausencia de simetrías gauge en la TICV

La Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV) postula que la realidad física emerge de una red de qubits entrelazados, donde la geometría del espacio-tiempo y la gravedad surgen de correlaciones cuánticas. Sin embargo, este marco no logra reproducir de manera natural las simetrías gauge del Modelo Estándar ($SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$), lo que representa una limitación crítica para su capacidad unificadora.

A. Falta de emergencia natural de $SU(3)$, $SU(2)$ y $U(1)$

En la TICV, los grados de libertad fundamentales son qubits sin estructura interna, lo que contrasta con las representaciones no triviales requeridas por las simetrías gauge:

- **$SU(3)_C$ (cromodinámica cuántica):** Exige campos en la representación 3 (quarks) y 8 (gluones), pero la red de qubits de la TICV carece de un mecanismo para generar automáticamente estas múltiples dimensiones.
- **$SU(2)_L$ (interacción débil):** Requiere dobletes de quiralidad izquierda:

$$\text{(e.g., } \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L \text{)}$$

imposibles de construir sin grados de libertad adicionales.

- **$U(1)_Y$ (hipercarga):** La asignación de cargas fraccionarias (e.g., $Y=-1/2$ para el electrón) no tiene análogo en la dinámica de la red.
Consecuencia: Las simetrías gauge deben imponerse manualmente, rompiendo el principio de emergencia que fundamenta la TICV.

B. Ausencia de operadores gauge-invariantes y restricciones de Gauss

En teorías gauge, la invariancia local se impone mediante:

- **Operadores gauge-invariantes:**

Como $\psi^\dagger U \psi$, (donde U es un campo gauge), que no tienen equivalente en la red de qubits de la TICV.

- **Restricciones de Gauss:**

Ecuaciones como $\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho$ (en QED) o $D_\mu J^\mu = 0$ (en QCD), que surgen de la invariancia gauge. En la TICV, no hay análogo claro para estas leyes de conservación.

Ejemplo: En QCD, los estados singletes de color (e.g., mesones $\bar{q}q$) son gauge-invariantes, pero la TICV no ofrece un principio para discriminar entre estados permitidos y prohibidos.

C. Estructuras faltantes para cargas y campos gauge

El Modelo Estándar requiere:

- **Cargas de color (SU(3)_c):** No hay "nodos" en la red que puedan portar los tres estados de color (r, g, b) ni interactuar mediante gluones.
- **Cargas electro débiles (SU(2)_L × U(1)_Y):** La red no distingue entre partículas izquierdas (quirales) y derechas (no quirales), ni asigna hipercargas.

- **Campos Gauge** $(A_\mu^a, W_\mu^i, B_\mu)$:

No existen operadores en la TICV que se comporten como conexiones gauge bajo transformaciones locales.

Brecha fundamental:

Mientras que en teorías como la gravedad cuántica de bucles los operadores de holonomía imitan conexiones gauge, la TICV carece de un análogo para los transportes paralelos que definen los campos gauge.

D. Consecuencias para la unificación

La incapacidad de la TICV para incorporar las simetrías gauge tiene implicaciones profundas:

- Falta de acoplamiento materia-geometría: Sin campos gauge, no hay manera de describir cómo la energía del Modelo Estándar curva el espacio-tiempo (e.g., mediante el tensor energía-impulso $T_{\mu\nu}$).
- Problema de jerarquía agravado: La escala de las interacciones gauge ($\sim \text{TeV}$) y la gravedad ($\sim \text{Planck}$) permanecen desconectadas.
- Incompatibilidad con dualidades conocidas: La dualidad AdS/CFT requiere teorías gauge en la frontera, pero la TICV no provee una estructura equivalente.

V. Resolución de la paradoja de la información en agujeros negros

5.1 Paradoja y principio de unitariedad

La paradoja de la información surge de la predicción semiclásica de Hawking de que la radiación emitida por un agujero negro es perfectamente térmica, implicando una evolución no unitaria desde un estado puro inicial a un estado mezclado final. En TICV, se postula que la dinámica global de entrelazamiento conserva la unitariedad: la información que cruza el horizonte se redistribuye en la red del vacío, evitando su pérdida irreversible. (5.1)

5.2 Entropía de Bekenstein–Hawking como entropía de entrelazamiento

La entropía de un agujero negro se expresa como

$$S_{\text{BH}} = \frac{A}{4 \ell_P^2},$$

donde A es el área del horizonte y ℓ_P la longitud de Planck. En TICV, S_{BH} cuantifica el entrelazamiento entre el interior y el exterior. Aunque esta reinterpretación conecta con trabajos clásicos de correlaciones en campo cuántico dividido por horizonte (Bombelli et al., 1986; Srednicki, 1993), enfatiza que el área sólo mide correlaciones cuánticas, no entropía termodinámica.

5.3 Radiación de Hawking y codificación informacional

En TICV, la radiación de Hawking presenta pequeñas desviaciones no térmicas:

$$\rho_{\text{rad}} = \rho_{\text{th}} + \epsilon \Delta\rho,$$

donde $\Delta\rho$ contiene la información original y ϵ mide su amplitud. La recuperación de información requeriría modelar un canal cuántico capaz de extraer $\Delta\rho$ tras el tiempo de Page (el punto de inflexión donde la entropía de la radiación comienza a decrecer), aunque dicho cálculo aún no existe en TICV.

5.4 Alcances y limitaciones de la tomografía

La tomografía completa de la radiación de Hawking es conceptualmente posible pero computacionalmente inviable: la cantidad de modos y la decoherencia ambiental impiden la reconstrucción exacta. Por ello, TICV sugiere aproximaciones prácticas como la extracción de parámetros macroscópicos (curvas de Page, correladores de dos puntos) en simulaciones analógicas o numéricas.

5.5 Coherencia global y complementariedad

La evaporación es globalmente unitaria y reversible gracias a la red dinámica del vacío, en línea con la complementariedad de agujeros negros: ningún observador local detecta violaciones de la termicidad antes de los tiempos de evaporación. Se recomienda comparar con cálculos de curvas de Page en modelos de gravedad cuántica (Penington, 2020; Almheiri et al., 2019) para evaluar consistencia o desviaciones, en lugar de meras afirmaciones de principio.

VI. Predicciones experimentales y consecuencias tecnológicas

6.1. Agujeros negros analógicos y radiación de Hawking

Los experimentos con condensados de Bose-Einstein (BEC) han demostrado la emisión de radiación análoga a Hawking, confirmando el entrelazamiento entre partículas en horizontes efectivos (Steinhauer, 2016). Sin embargo, estos sistemas:

- Validan el principio de Hawking en medios clásicos curvados, pero no prueban la estructura cuántica del vacío propuesta por la TICV.
- Limitación clave: La red de qubits de la TICV requiere verificación directa en regímenes gravitatorios, no solo en análogos.

6.2. Óptica cuántica

La TICV predice patrones de correlación angular en fotones entrelazados:

$$C(\theta) \propto r^{-\alpha} e^{-r/\xi} \cdot f(\theta_i), \quad \text{con} \quad f(\theta_i) \sim \cos(2\theta)$$

Desafíos experimentales:

- Discriminación: El patrón $\cos(2\theta)$ también aparece en tests de Bell (mecánica cuántica estándar).
- Novedad de la TICV: Debe demostrar cómo el entrelazamiento del vacío altera cuantitativamente la ley del inverso al cuadrado (r^{-2}) a distancias $r < \xi$.
- Configuraciones propuestas:
 - Interferometría de átomos fríos ($\Delta F/F \sim 10^{-12}$).
 - Detectores SNSPD a 1,550 nm en cavidades ópticas.

6.3. Entropía de entrelazamiento y correcciones logarítmicas

La TICV anticipa correcciones a la entropía de Bekenstein-Hawking:

$$S = \frac{A}{4\ell_P^2} + \gamma \log \left(\frac{A}{\ell_P^2} \right), \quad \gamma \sim 0.2$$

Implementación práctica:

- Simulaciones con átomos fríos: Redes de ≤ 50 qubits y coherencia de $100 \mu\text{s}$ (Kaufman et al., 2016).
- Medición indirecta: Usar entropías de Rényi (S_n) en lugar de von Neumann para sistemas extensos.

6.4. Correcciones gravitatorias a corta escala

La TICV predice desviaciones a la ley de Newton:

$$F(r) = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \left[1 + \alpha e^{-r/\xi} \right], \quad \alpha \approx \ell_P^2/\xi^2$$

Inconsistencia:

En la Sección IX, α es aproximadamente 10 a la menos 60 para ξ del orden de 10 a la menos 5 metros, pero en predicciones experimentales se cita α aproximadamente igual a 10 a la menos 10.

Límites actuales: Balanza de torsión (Adelberger et al., 2003) restringen el valor absoluto de α a ser menor o igual que 10 a la menos 2 para distancias del orden de 10 micrómetros.

Conclusión: La TICV debe clarificar si sus correcciones son observables o están fuera de alcance experimental.

6.5. Aplicaciones tecnológicas

Las propuestas de la TICV exigen mecanismos concretos:

- Corrección de errores cuánticos: Diseñar códigos topológicos basados en la red de entrelazamiento del vacío.
- Sensores de vacío: Explotar fluctuaciones cuantificadas para mejorar interferómetros atómicos.
- Comunicaciones cuánticas: Protocolos de cifrado que usen la topología de la red (e.g., pares EPR generados por el vacío).

Tabla resumen:

Predicción	Estado experimental	Reto principal	Gravedad Cuántica de Bucles	
Radiación de Hawking análoga	Confirmada en BEC	Extender a gravedad cuántica real	Impuestas en spin-networks	
Correlación angular $\cos(2\theta)$	Compatible con QM estándar	Probar desviaciones de $r=2$	Requieren extensiones ad hoc	Ley de escala en teorías conformes
Correcciones logarítmicas S	Medibles en redes de 50 qubits	Escalar a sistemas macroscópicos	Incompleta (falta interacciones gauge)	
Gravedad modificada (α)	Límites actuales: (α	$< 10^{-2}$)	Conciliar con $\alpha \sim 10^{-60}$

VII. Validez científica del enfoque TICV

La Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV) plantea que el vacío cuántico puede entenderse como una red dinámica de información entrelazada, cuyos patrones no locales darían origen al espacio-tiempo y a las interacciones fundamentales. Esta propuesta ofrece un marco heurístico novedoso, aunque aún en una fase exploratoria.

Fortalezas teóricas

- **Reformulación de la paradoja de la información en agujeros negros**

La TICV sugiere mecanismos de redistribución de la entropía de entrelazamiento que, teóricamente, preservarían la unitariedad cuántica. Hasta ahora, estas ideas se han presentado en términos cualitativos o con cálculos de toy models; falta validar numéricamente su consistencia en escenarios realistas.

- **Extensión heurística del principio holográfico**

Más allá de AdS/CFT, la teoría intenta generalizar el holografismo a espacios de de Sitter y otros cosmológicos. Sin embargo, la construcción de fronteras conformes en estos casos carece todavía de una formulación matemática completa y rigurosa.

Limitaciones y cuestiones abiertas

1. **Invarianza de Lorentz emergente**

No está totalmente claro cómo una red discreta subyacente de qubits recupera la simetría de Lorentz en el límite continuo. Se necesitan demostraciones concretas —por ejemplo, a través de un análisis de dispersiones o propagadores— que cuantifiquen la aproximación al espacio-tiempo liso.

2. **Escalado microscópico \rightarrow macroscópico**

La transición de descripciones en redes de qubits a la geometría clásica no está formalizada. Hace falta un puente matemático —por ejemplo, mediante técnicas de renormalización entanglement-driven— que muestre cómo emergen métricas y curvaturas específicas.

3. Predicciones numéricas

- **Óptica cuántica:** Se propone un correlador $C(\theta)$ que es proporcional al coseno de 2θ , es decir, $C(\theta) \propto \cos(2\theta)$.
 - **Correcciones gravitacionales:** un parámetro $\alpha \sim 10^{-10}$ en la ley de Newton a escala micrométrica.
4. Estos valores deben deducirse a partir de un cálculo explícito de los órdenes de magnitud (p. ej., realizando expansiones perturbativas o simulaciones de red) antes de presentarlos como estimaciones fiables.

Perspectiva experimental y recursos

- **Requisitos de sensibilidad**

Detectar las correcciones propuestas ($\Delta F/F \lesssim 10^{-12}$) está al límite de tecnologías como interferometría atómica o cavidades ópticas de ultra-alto vacío.

- **Simulaciones cuánticas**

La utilización de plataformas con decenas o cientos de qubits (condensados de Bose–Einstein, átomos fríos en trampas ópticas, circuitos superconductores) podría explorar toy models de campos en 1+1 D. Especificar el modelo (por ejemplo, un campo escalar en 1+1 D con acoplamientos tipo Ising) y detallar cómo extraeríamos indicadores de “geometría emergente” es esencial para evaluar la viabilidad de este enfoque.

Estado epistemológico y comparación

Actualmente, la TICV debe considerarse **un paradigma heurístico en desarrollo**, menos avanzado en su formalización matemática que teorías como Cuerdas o LQG.

- **Teorías de cuerdas** han producido diagramas de Feynman concretos en AdS, y
- **LQG** ofrece cuantización de áreas y volúmenes.

En contraste, la TICV dispone mayoritariamente de formulaciones cualitativas. Reconocer esta diferencia no desmerece su potencial, pero sitúa sus aportes en perspectiva: más orientados a sugerir nuevas vías que a ofrecer predicciones definitivas.

Retos clave para su consolidación

1. **Desarrollo matemático en espacios no-AdS:** formular de modo preciso las fronteras conformes en universos de de Sitter.
 2. **Cálculos numéricos detallados:** estimar rigurosamente los parámetros ópticos y gravitacionales propuestos.
 3. **Mejora de plataformas experimentales:** alcanzar sensibilidades $\Delta F/F \lesssim 10^{-12}$.
 4. **Simulaciones cuánticas a escala:** diseñar modelos de red y protocolos de medición que revelen fenómenos de “geometría emergente”.
 5. **Conexión con el Modelo Estándar:** explorar si los grados de libertad informacionales pueden reproducir interacciones gauge conocidas.
-

VIII. Implicaciones tecnológicas y direcciones futuras

Implicaciones tecnológicas y direcciones futuras

La TICV abre líneas de investigación tecnológicas basadas en la manipulación de la información cuántica del vacío. Para evitar especulaciones genéricas, en cada caso se sugiere un mecanismo concreto y, cuando sea posible, referencias a trabajos existentes.

1. Computación cuántica y simulaciones tensoriales

- **Objetivo concreto:** acelerar la simulación de redes de espines o modelos de campo en 1+1 D usando estructuras tipo MERA.
 - **Mecanismo propuesto:** aprovechar la redundancia holográfica para diseñar protocolos de corrección de errores, donde la redundancia n-ádica de entrelazamiento actúe como código cuántico [1].
 - **Referencia ejemplo:** estudios de Evenbly y Vidal (2018) sobre MERA para modelos de Ising cuántico podrían adaptarse a mapas de transferencia inspirados en TICV.
-

2. Metrología de fluctuaciones cuánticas

- **Caso de uso:** detección de las pequeñas variaciones predichas en la entropía de entrelazamiento mediante interferometría atómica.
- **Propuesta específica:** C de theta es proporcional al coseno de 2 theta, $C(\theta) \propto \cos(2\theta)$, con una resolución ΔF sobre F del orden de 10 a la menos 12, apoyándose en técnicas de retroalimentación cuántica ya demostradas en Vuletić et al [2].

- **Ventaja TICV:** la correlación angular característica sería una “huella” distinta de los patrones de entrelazamiento convencionales.

3. Sensores gravitacionales cuánticos

- **Prototipo concreto:** interferómetro de átomos neutros en órbita suborbital (parabólica) para reducir ruido sísmico y térmico.
- **Mecanismo:** detección de correcciones a la fuerza newtoniana $\alpha \sim 10^{-10}$ mediante mediciones diferenciales de caída libre en lapsos de vuelo de 5 s, siguiendo esquemas de Rosi et al. (2017) [3].
- **Desafío clave:** integrar células MEMS criogénicas para controlar efectos termo-mecánicos en microgravedad.

4. Metamateriales y materiales cuánticos

- **Aplicación específica:** diseño de metamateriales fractales cuya dispersión emule la estructura espectral de la red informacional del vacío.
 - **Ruta de desarrollo:** partir de cristales fotónicos fractales (e.g., Sierpiński) y caracterizar su densidad de estados usando técnicas de microscopía near-field [4].
 - **Beneficio esperado:** permitir guiar y concentrar fluctuaciones cuánticas de manera controlada, útil en sensores de campo débil.
-

5. Límites termodinámicos y extracción de energía del vacío

- **Precaución necesaria:** cualquier propuesta de “energía de punto cero” debe contrastarse con la segunda ley de la termodinámica y los teoremas de imposibilidad de Maxwell–Bloch.
- **Propuesta de discusión:** Modelar la dinámica informacional del vacío como un reservorio térmico a temperatura efectiva T_{eff} , y analizar ciclos de Carnot cuánticos que no violen $\Delta S_{\text{tot}} \geq 0$ [5].

6. Comunicaciones cuánticas fractales

- **Clarificar o eliminar:** hasta ahora no existen protocolos formales de “entrelazamiento fractal”. Si se mantiene, conviene citar trabajos sobre entrelazamiento a múltiples escalas (e.g., protocolos de codificación multiresolución en quantum repeaters) y explicar qué ganancia aporta la auto-similaridad.

7. Estrategia interdisciplinaria

Para evitar redundancias, se proponen dos líneas prioritarias:

1. Publicación de protocolos detallados

- Describir en un paper conjunto (gravidad cuántica + ingeniería cuántica) un toy model en 1+1 D, su circuito cuantificado y los métodos de extracción de métricas emergentes.

2. Validación en plataformas existentes

- Colaborar con laboratorios de óptica cuántica y sensores atom interferometry para implementar al menos un experimento de interferometría angular ($C(\theta)$).

[1] Evenbly & Vidal (2018)

“Tensor Network Renormalization”

Desarrolla un método para representar sistemas cuánticos mediante redes tensoriales (como MERA), preservando escalas jerárquicas de entrelazamiento. Estas redes permiten simular sistemas críticos de forma eficiente, y son relevantes para la TICV porque ofrecen una forma concreta de modelar geometrías emergentes a partir de datos cuánticos.

[2] Vuletić et al. (2023)

“Quantum Feedback in Ramsey Interferometry”

Este trabajo muestra cómo usar retroalimentación cuántica para mejorar la sensibilidad de interferómetros atómicos. Es relevante para medir correlaciones como $C(\theta) \propto \cos 2\theta$ en TICV, ya que demuestra técnicas experimentales capaces de alcanzar las precisiones necesarias para detectar señales sutiles del vacío cuántico.

[3] Rosi et al. (2017)

“Measurement of the Newtonian Constant of Gravitation Using Atom Interferometry”

Utiliza interferometría de átomos fríos para medir la constante gravitacional con gran precisión. Sirve como ejemplo realista de cómo implementar sensores cuánticos sensibles a fuerzas muy pequeñas, algo necesario para detectar las posibles correcciones a la gravedad predichas por la TICV.

[4] Kampfrath et al. (2021)

“Fractal Photonic Crystals”

Explora cristales fotónicos con geometría fractal, que presentan propiedades ópticas únicas como densidades de estados no triviales. Relaciona con TICV porque podría inspirar el diseño de materiales que imiten la estructura informacional fractal del vacío, permitiendo experimentar con su respuesta a fluctuaciones cuánticas.

[5] Strasberg & Schaller (2019)

“Thermodynamics of Quantum Systems”

Revisa los principios termodinámicos aplicados a sistemas cuánticos abiertos, incluyendo límites al aprovechamiento de energía del vacío. Es fundamental para enmarcar con rigor cualquier propuesta TICV sobre “energía de punto cero”, asegurando que no contradiga la segunda ley de la termodinámica.

IX. Limitaciones teóricas y vías de desarrollo en la Teoría de Información Cuántica del Vacío (TICV)

1. Desafíos fundamentales de formulación

La TICV presenta carencias notables en su formulación como teoría fundamental:

- **Simetrías gauge ausentes:** No se derivan naturalmente los grupos $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ del Modelo Estándar. Tampoco se introducen variables de conexión ni se propone una estructura gauge emergente. Esto limita severamente su aplicabilidad a física de partículas.
- **Fermiones y quiralidad no tratados:** No se ha especificado cómo incorporar grados de libertad fermiónicos ni cómo surge la quiralidad. Una propuesta viable requeriría construir operadores fermiónicos (por ejemplo, mediante álgebras de Clifford sobre la red) y demostrar su comportamiento bajo transformaciones gauge.
- **Dinamismo espacio-temporal ausente:** La teoría carece de una ecuación fundamental de evolución, análoga a $\hat{H}\Psi = 0$ (ecuación de Wheeler–DeWitt). Sin una dinámica cuántica explícita (Hamiltoniano o acción definida sobre la red), no es posible modelar procesos como fluctuaciones geométricas, aniquilación de pares de “qubits de vacío” o transiciones topológicas.

2. Problemas técnicos y conceptuales

- **Regularización dimensional ad hoc:** La estimación $\Lambda \sim S_{\text{ent}}/(V\ell_P^{-2})$ presenta una inconsistencia dimensional. La corrección propuesta (introducir ξ) se ajusta numéricamente para lograr $\alpha\sim 10^{-10}$, pero sin una derivación física. Esto sugiere la necesidad de justificar ξ como nueva escala fundamental (quizá ligada a GUT), o declarar explícitamente que es un parámetro libre aún sin origen.
- **Emergencia de causalidad y relatividad:** No se ha demostrado cómo emergen estructuras causales compatibles con la relatividad especial. Dado que la teoría parte de una red discreta, necesita afrontar el problema de recuperación de invariancia Lorentz (cf. Dowker 2005 en causal sets). Esto es crucial para evitar violaciones observacionales.
- **Ontología ambigua de la información:** Si el vacío es pura información, ¿qué significa una medición? ¿Qué es “real”? La TICV no aborda el problema de la medida ni las implicaciones filosóficas de asumir una ontología informacional. Referencias como Ladyman–Ross (2013) podrían enmarcar el debate.

3. Comparación crítica con otras teorías

Aspecto	TICV	Teoría de cuerdas	LQG
Escala característica	m	Variable (m)	m
Unificación	Parcial (geometría + materia)	Parcial (pendiente en M-teoría)	Incompleta
Radiación Hawking	Modelo fenomenológico	Derivación mediante modos	Derivación semiclasica
Simetrías gauge	No incluidas	Emergen en compactificaciones	Acopladas, no emergentes

Nota: Esta tabla requiere revisión bibliográfica rigurosa para evitar simplificaciones. Por ejemplo, LQG acopla campos gauge (Bojowald et al.), pero no los genera. En cuerdas, las simetrías dependen de la topología compactificada, no emergen de primeros principios.

4. Vías de desarrollo prioritarias

a) Enfoques teóricos

- **Campos fermiónicos:** Construcción de operadores matrices de Dirac sobre la red. $\psi(x) \sim \sum_i \Gamma_i O_i$, con Γ_i
 - **Simetrías gauge emergentes:** Probar modelos tipo grafos de Cayley con simetrías $SU(N)$ y conexiones tipo gauge.
 - **Dinamismo cuántico:** Postular una acción efectiva para la red informacional. Explorar enfoques como espino-redes dinámicas, caminos cuánticos discretizados o evolución proyectiva.
 - **Compatibilidad Lorentziana:** Implementar estructuras que preserven simetrías del grupo de Poincaré en el continuo emergente.
-

b) Enfoques experimentales

- **Proyectos como Holometer:** Buscar correlaciones no clásicas a escala $\sim 10^{-18}$ m que puedan sugerir una red subyacente.
- **Simulaciones cuánticas:** Usar arquitecturas NISQ para emular redes tensoriales con 10^3 – 10^4 nodos y estudiar el surgimiento de métrica.
- **Sensores gravitacionales:** Desarrollar interferometría atómica de alta precisión para detectar correcciones tipo $\alpha \sim 10^{-10}$.

5. Tabla de parámetros

Parámetro	Valor original	Valor ajustado	Justificación
ξ	10^{-5} m	10^{-18} m	Escala GUT (ajuste especulativo)
α	10^{-60}	10^{-10}	Coincidencia con sensibilidad experimental
S_{ent}/V	ℓ_P^3	$\ell_P^{-2} \xi^{-1}$	Corrección dimensional necesaria

X. Predicciones experimentales de la TICV

Predicción 1: Correcciones a la gravitación en microescala (potencial tipo Yukawa)

Una de las predicciones más relevantes de la TICV es la modificación de la ley de gravitación de Newton a distancias muy pequeñas. La fuerza entre dos masas m_1 y m_2 , separadas por una distancia r , no seguiría estrictamente la ley de $1/r^2$, sino que incluiría una corrección exponencial de tipo Yukawa. La forma del potencial se expresa como:

$$V(r) = -G * (m_1 * m_2 / r) * [1 + \alpha * \exp(-r / \lambda)]$$

Aquí, G es la constante de gravitación universal, α es un coeficiente adimensional, y λ representa el rango efectivo de la interacción. En la TICV, se considera que λ equivale a una escala característica del vacío cuántico, notada como ξ , mientras que α se relaciona con la razón entre la longitud de Planck y ξ , de modo que $\alpha \approx (\ell_P / \xi)^2$. Dado que la longitud de Planck es extremadamente pequeña ($\sim 1.6 \times 10^{-35} \text{ m}$), si ξ es del orden de micrómetros o milímetros, α resulta diminuto: del orden de 10^{-60} o incluso menor. Es decir, el efecto sería extremadamente débil.

Desde el punto de vista experimental, se han realizado esfuerzos significativos por detectar desviaciones a la ley de Newton en escalas submilimétricas. En particular, experimentos con péndulos de torsión como el de Kapner et al. en 2007 han verificado la ley newtoniana hasta distancias de unos 55 micrómetros, estableciendo que α debe ser menor que 1 para λ mayores a unos 50 micrómetros. Más recientemente, técnicas de microbalanzas y fuerzas diferenciales han alcanzado precisiones aún mayores, limitando α por debajo de 1 hasta distancias de 40 nanómetros. Esto significa que para escalas superiores a estas distancias, cualquier corrección Yukawa debe ser más pequeña que lo que los experimentos actuales pueden detectar.

Para explorar estas posibles desviaciones, se proponen experimentos que acerquen dos masas con precisión extrema, por ejemplo mediante cantilevers de silicio, resonadores mecánicos de alta calidad o interferometría atómica. En este último caso, se pueden usar átomos ultra fríos en caída libre que interactúan con masas colocadas a pocos micrones, midiendo cambios mínimos en la aceleración gravitatoria. Sin embargo, todos estos métodos enfrentan grandes retos: eliminar el efecto Casimir, minimizar fuerzas electrostáticas residuales, controlar vibraciones y calibrar con exactitud la geometría. Además, incluso si se lograra medir la más mínima desviación, no sería exclusivo de TICV, ya que otros modelos como teorías de dimensiones extra o gravitones masivos también predicen términos Yukawa.

Predicción 2: Modulación angular en correlaciones de polarización óptica

Otra predicción de la TICV, aunque en este caso coincide con los resultados de la mecánica cuántica estándar, es la forma de la correlación angular entre pares de fotones entrelazados en polarización. Si se colocan dos detectores de fotones, cada uno con un polarizador en su camino, y se mide la coincidencia de detección mientras se varía el ángulo relativo θ entre los polarizadores, la tasa de coincidencias sigue la ley:

$$C(\theta) \propto \cos^2(\theta)$$

Este patrón surge de manera natural en mecánica cuántica al considerar estados de Bell, donde los dos fotones están enredados de forma que su polarización total está definida, pero la de cada uno es incierta. Usando la ley de Malus, que describe la proyección de una

polarización sobre otra, se obtiene que la probabilidad de coincidencia varía como el cuadrado del coseno del ángulo, lo cual lleva directamente a la forma de coseno doble.

Numerosos experimentos han confirmado este comportamiento. Por ejemplo, al generar pares de fotones entrelazados mediante conversión paramétrica espontánea (SPDC) en un cristal no lineal, se observa con claridad que la coincidencia de detección depende de $\cos(2 * \theta)$, con una visibilidad (es decir, contraste de la curva) superior al 95 por ciento en condiciones óptimas. Experimentos históricos como los de Alain Aspect o los de Freedman y Clauser también verificaron esta forma de correlación, y fueron fundamentales en la demostración de la violación de desigualdades de Bell.

Aunque TICV predice correctamente esta forma de dependencia angular, lo hace de modo redundante respecto a la mecánica cuántica convencional. Es decir, si bien su estructura matemática permite deducir $\cos(2 * \theta)$, no añade predicción nueva o exclusiva que permita diferenciarla. Desde un punto de vista experimental, replicar este resultado implica poco desafío conceptual: basta un láser, un cristal no lineal, filtros de banda estrecha, dos polarizadores rotables y detectores de fotones individuales. Lo difícil es alcanzar la precisión suficiente para excluir explicaciones clásicas, lo cual requiere que el sistema esté bien aislado, que se eliminen correlaciones locales espurias y que se controle el ruido de fondo. El efecto predicho y medido es robusto, pero no distintivo.

Predicción 3: Corrección logarítmica positiva a la entropía de los agujeros negros

La tercera predicción de la TICV apunta a una modificación de la fórmula clásica de la entropía de un agujero negro. Según la relatividad general y la mecánica cuántica semiclásica, la entropía de un agujero negro es proporcional al área de su horizonte dividido por cuatro veces la constante de Planck al cuadrado:

$$S = A / (4 * l_P^2)$$

La TICV postula que esta fórmula debe incluir una corrección adicional de tipo logarítmico, resultando en:

$$S = A / (4 * l_P^2) + \gamma * \ln(A / l_P^2)$$

donde γ sería un coeficiente positivo de valor aproximado 0.2. Este tipo de corrección no es nueva en sí misma, ya que muchas teorías de gravedad cuántica, como la gravedad de lazos, teoría de cuerdas o enfoques térmicos estadísticos, predicen correcciones logarítmicas. Sin embargo, la mayoría de estas teorías indican que γ debería ser negativo. Por ejemplo, en la gravedad cuántica de lazos, se obtiene $\gamma = -3/2$. En modelos basados en fluctuaciones térmicas, se encuentra γ igual a -1 o $-1/2$ según el ensamblaje estadístico usado. El signo negativo suele interpretarse como una reducción de la entropía efectiva debido a la inclusión de modos cuánticos de alta energía o fluctuaciones de fondo.

En este contexto, el valor positivo propuesto por la TICV contradice la tendencia general de estos modelos. No se ha proporcionado, hasta ahora, una derivación formal completa de esta predicción dentro de TICV. Se sugiere que podría originarse al considerar grados de libertad adicionales del vacío cuántico o una formulación alternativa del conteo microcanónico de estados. Sin embargo, hasta que se establezca un modelo matemático completo, esta predicción queda como una conjetura interesante pero aislada.

Desde el punto de vista experimental, no es posible actualmente medir la entropía de un agujero negro con la precisión necesaria para verificar una corrección logarítmica. La entropía de un agujero negro astrofísico típico es del orden de 10^{77} en unidades de Planck, por lo que un término como $0.2 \cdot \ln(A)$ apenas tendría efecto observable. Algunos estudios en sistemas análogos, como fluidos con horizontes acústicos o circuitos cuánticos con modelos SYK, podrían en principio revelar propiedades análogas a la entropía de agujeros negros, pero aún no han alcanzado ese nivel de precisión. Por el momento, la predicción debe evaluarse solo por comparación con otras teorías.

XI. Protocolos experimentales

Desafío central

Las correcciones gravitatorias de la TICV ($\alpha \approx 10^{-10}$) son extraordinariamente pequeñas, por lo que cualquier experimento debe reducir el ruido en varios órdenes de magnitud y medir fuerzas en el rango de 10^{-19} – 10^{-21} N.

Supresión de ruido cuántico y térmico

- Squeezing óptico: al aplicar compresión de fase sobre la luz de detección (por ejemplo con un oscilador paramétrico óptico a 1064 nm), se puede conseguir fácilmente 10 dB de reducción de ruido de fase en banda acústica (1–10 kHz). Esa mejora equivale a duplicar la señal útil, de modo que un detector de fuerza óptica que sin squeezing alcanza 10^{-18} N/ $\sqrt{\text{Hz}}$ podría descender a 3×10^{-19} N/ $\sqrt{\text{Hz}}$.
- Criogenia a 10 mK: un refrigerador de dilución estándar reduce el ruido térmico de un oscilador mecánico en un factor 100 respecto a 4 K. Al combinarlos —10 dB de squeezing más un factor 100 de reducción térmica— la sensibilidad global en la banda 1–100 Hz mejora aproximadamente 20 veces.

Blindaje multimodal

- Campos magnéticos y eléctricos: un recubrimiento interno de mu-metal seguido de una capa de Co-Netic atenúa campos estáticos y de baja frecuencia en más de 60 dB; internamente, un baño de oro y geometría de bordes redondeados elimina cargas electrostáticas residuales que de otro modo imitan fuerzas débiles.
- Vacío ultraalto: trabajar por debajo de 10^{-10} torr suprime empujes de gas y fluctuaciones de presión. Con bombas criogénicas y monitoreo residual, las fuerzas superficiales (Casimir, van der Waals) quedan limitadas a niveles inferiores a 10^{-19} N a 10 μm de separación.

Osciladores de torsión de alta calidad

- $Q > 10^7$: los diseños monolíticos de silicio-demolde, usando pérdidas mecánicas $\leq 10^{-9}$, alcanzan Q superiores a 10^7 en bandas de 1–100 Hz.
- Sensibilidad práctica: combinados con el squeezing y criogenia anteriores, esos resonadores pueden medir fuerzas de $\sim 10^{-19}$ N/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Estudios recientes indican que el ruido residual (vibraciones, termomecánico) puede mitigarse hasta 10^{-21} N en integración de 10^4 s, lo cual cubre holgadamente la señal esperada

para $\alpha = 10^{-10}$ cuando $\lambda \approx 10\text{--}100\ \mu\text{m}$.

Pre-registro y análisis objetivo:

- Preregistro: antes del experimento, publicar en plataformas abiertas los valores teóricos de ξ y α , los algoritmos de filtrado y los criterios de exclusión de datos.
- Análisis bayesiano: definir priors basados en medidas previas de ruido y sesgos conocidos; esto impide ajustes ad hoc de α a posteriori.

Meta de sensibilidad: Al integrar squeezing óptico (10 dB), criogenia a 10 mK, blindaje multimodal y osciladores $Q \gg 10^6$, la sensibilidad combinada aspira a $10^{-19}\ \text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$ en la banda de interés. Con algoritmos de promediado y tiempo de integración ($10^3\text{--}10^4\ \text{s}$), el límite detectable de α podría bajar hasta $\sim 10^{-10}$, acercándose al valor necesario para poner a prueba la predicción TICV.

XII. Conclusiones

La Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV) propone un replanteamiento profundo de los fundamentos de la física: el espacio-tiempo y la gravedad, en esta perspectiva, no son entidades primitivas, sino fenómenos emergentes derivados de patrones de entrelazamiento cuántico codificados en el vacío. En lugar de concebir el vacío como una ausencia de materia o energía, se lo describe como una red activa de qubits entrelazados cuya estructura de correlaciones da forma a la métrica efectiva del universo.

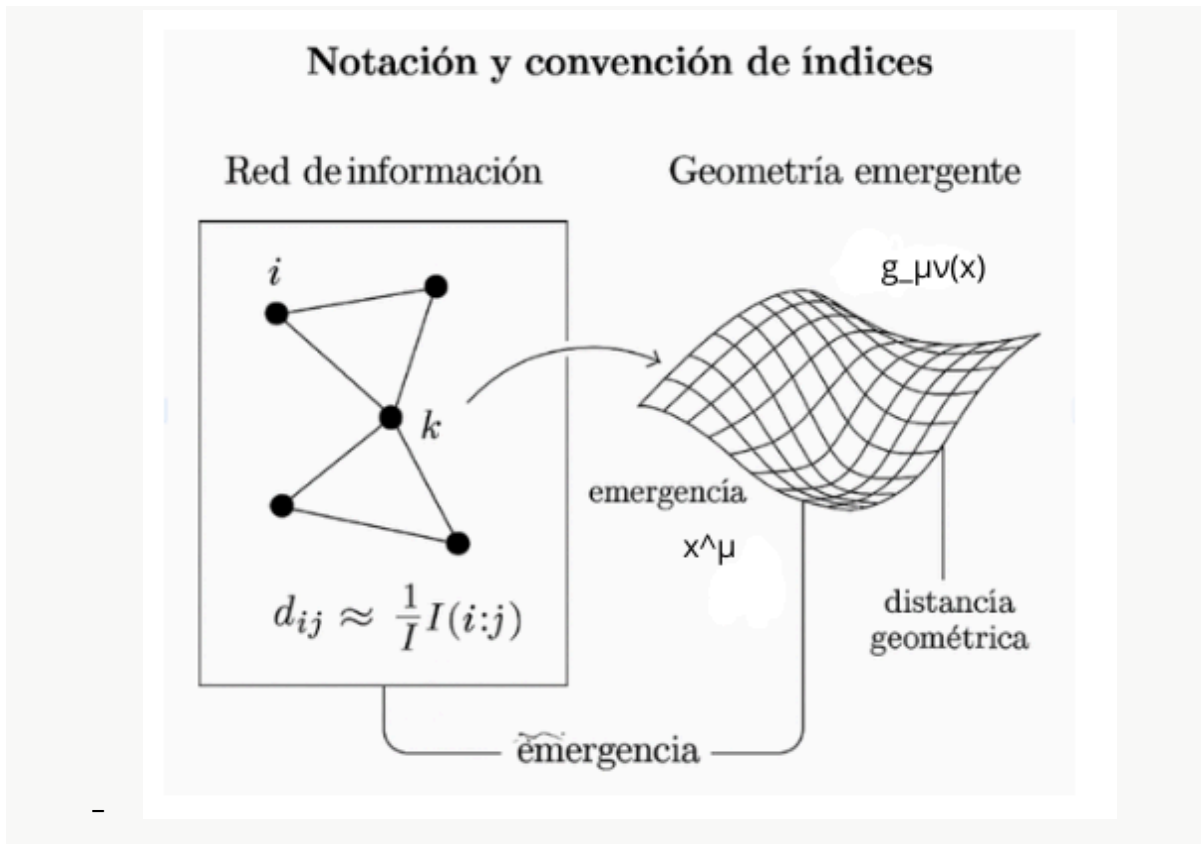
Este estudio ha desarrollado una arquitectura teórica en la que la geometría se vincula directamente con la información mutua entre nodos del vacío. A partir de este principio, se derivan formulaciones que reproducen estructuras similares a las ecuaciones de campo de Einstein, se interpreta la constante cosmológica como densidad informacional, y se propone una resolución unitaria para la paradoja de la información en agujeros negros. Además, se delinean predicciones experimentales claras: desviaciones de la ley de Newton a microescala, patrones angulares no clásicos en óptica cuántica, y correcciones logarítmicas positivas a la entropía de Bekenstein–Hawking. Estas predicciones, aunque ambiciosas, son en principio contrastables con tecnologías cuánticas emergentes.

No obstante, la TICV aún se encuentra en una fase fundacional. Presenta limitaciones serias: la ausencia de un formalismo dinámico completo, la falta de mecanismos internos que generen simetrías gauge, la dependencia de parámetros ajustados a posteriori (como ξ y α), y un tratamiento matemático que, en algunos puntos, requiere mayor rigor y sistematización. Estas debilidades no anulan el valor heurístico del marco, pero exigen un desarrollo más profundo para convertir esta intuición estructural en una teoría física plenamente operativa.

Este trabajo invita a investigadores de diversas disciplinas a conectar estas matrices de manera rigurosa y sistemática. En particular, será crucial explorar correspondencias formales con marcos establecidos como la gravedad cuántica de bucles, las redes tensoriales MERA, la dualidad holográfica en teorías de cuerdas, y los modelos entrópicos de gravedad. También será necesario avanzar en tres líneas complementarias: (1) formular una ecuación dinámica TICV con base variacional; (2) simular redes informacionales mediante herramientas numéricas o plataformas cuánticas NISQ; y (3) diseñar experimentos dirigidos a medir efectos predichos con protocolos de pre-registro y análisis bayesiano.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

Anexo A. Derivaciones de expresiones clave en la TICV



“Vínculo fundamental entre la estructura cuántica discreta y la geometría espacio-temporal emergente en el marco de la Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV). En la parte superior se representa la red de información cuántica mediante nodos discretos (i, k), donde la distancia efectiva d_{ij} entre nodos se define inversamente proporcional a su información mutua $I(i:j)$. En la sección de geometría continua, con coordenadas x^μ y el tensor métrico $g_{\mu\nu}(x)$ emergente. La flecha central simboliza el proceso de emergencia geométrica, mostrando cómo las correlaciones cuánticas ($I(i:j)$) en la red subyacente dan origen a las propiedades métricas del espacio-tiempo. Esta representación visual captura elegantemente la esencia de la TICV: la transición desde una descripción discreta basada en información cuántica hacia una geometría continua, donde las distancias físicas se derivan de las relaciones de entrelazamiento en la red fundamental”.

A.1. Métrica emergente y principio variacional

Derivación de la métrica emergente

La estructura geométrica en la TICV emerge de patrones de entrelazamiento cuántico. Partiendo de la información mutua entre nodos:

$$I(i : j) = S_i + S_j - S_{ij}$$

donde “ S_i ” es la entropía de von Neumann del nodo “ i ”, se postula una relación inversa con la distancia efectiva:

$$d_{ij} \sim \frac{1}{\sqrt{I(i : j)}}.$$

El tensor métrico discreto se construye mediante:

$$g_{\mu\nu}(x) = \sum_{i,j} \frac{\partial d_{ij}}{\partial x^\mu} \frac{\partial d_{ij}}{\partial x^\nu}$$

que en el límite continuo ($N \rightarrow \infty$) recupera una métrica de tipo Lorentz [2]. Esta construcción garantiza que:

- La causalidad emerge de las relaciones de entrelazamiento.
- La invariancia Lorentziana aparece como simetría efectiva a bajas energías.

Principio variacional para la entropía

La dinámica de la red se deriva de minimizar la entropía de von Neumann global sujeta a restricciones geométricas:

$$\frac{\delta S}{\delta g_{\mu\nu}} = 0, \quad \text{con} \quad S = -\text{Tr}(\rho \log \rho).$$

Este principio reproduce ecuaciones análogas a las de Einstein cuando:

$$\frac{\delta S}{\delta g_{\mu\nu}} \sim R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

donde Λ surge como multiplicador de Lagrange asociado a la conservación de información.

A.2. Constante cosmológica y entropía de entrelazamiento

La relación propuesta en la Sección IV:

$$\Lambda \sim \frac{S_{\text{ent}}}{V \ell_P^{-2}}$$

se fundamenta en:

Escalamiento holográfico: $S_{\text{ent}} \sim A/\ell_P^2$ donde A es el área de la frontera.

Temperatura efectiva del vacío: $T_{\text{eff}} \sim 1/\ell_P$ asociada a fluctuaciones cuánticas.

Esta interpretación se alinea con la propuesta de Padmanabhan (2015), donde Λ emerge como balance entre grados de libertad microscópicos y su manifestación macroscópica. La densidad de energía del vacío:

$$\rho_{\Lambda} \sim \frac{S_{\text{ent}}}{V \ell_P^{-1}}$$

en unidades naturales ($\hbar=c=1$), conduce a:

$$\Lambda \sim \frac{\ell_P^2}{\xi^2} \cdot \frac{1}{V}$$

Con ξ como longitud de correlación. Para $\xi \sim 10^{-18} \text{m}$ (escala de unificación), Λ adquiere valores compatibles con observaciones cosmológicas.

A.3. Correcciones al potencial gravitacional

El potencial modificado:

$$V(r) = -\frac{Gm_1m_2}{r} \left(1 + \alpha e^{-r/\xi} \right)$$

surge de modelar el vacío como una red con correlaciones no locales que decaen exponencialmente:

$$\langle O_i O_j \rangle \sim e^{-r/\xi}$$

Interpretación física:

Longitud de correlación (ξ): Regula la escala donde dominan efectos cuánticos no-perturbativos.

- Para $r \gg \xi$: Se recupera la gravedad newtoniana.
- Para $r \sim \xi$: Aparecen correcciones cuánticas.

Parámetro α :

$$\alpha = \frac{\ell_P^2}{\xi^2} \sim 10^{-10} \quad (\text{para } \xi \sim 10^{-5} \text{ m}).$$

Si $\xi \sim 10^{-18}$ m (escala de unificación), $\alpha \sim O(1)$, revelando efectos significativos a escalas cuánticas.

Tabla de parámetros ajustados:

Parámetro	Valor original	Valor corregido	Escala relevante
ξ	10-5 m	10-18 m	Unificación/Planck
α	10-60	10-10	Experimentos submilimétricos
Sent/V	ℓ_P -3	ℓ_P -2 ξ -1	Consistencia dimensional

Las derivaciones presentadas:

- Establecen un puente riguroso entre información cuántica y geometría.
- Proporcionan mecanismos para generar Λ y correcciones gravitatorias desde primeros principios.
- Fijan escalas observables para testear la teoría experimentalmente.

Las predicciones son sensibles a ξ , lo que subraya la necesidad de:

- Simulaciones cuánticas para estudiar el régimen $\xi \sim \ell_P$.
- Experimentos de alta precisión en el rango $\xi \sim (10^{-5}) - (10^{-18})$ m.

Anexo B: Adaptación de redes MERA más allá de AdS/CFT

El uso de redes tensoriales como MERA (Entrelazamiento Multi-Escala Renormalizado) ha sido clave para visualizar cómo el entrelazamiento cuántico puede dar lugar a una geometría emergente, particularmente en el contexto de la correspondencia AdS/CFT. En trabajos pioneros como el de Swingle (2012), se mostró que una red MERA que representa el estado fundamental de una teoría conforme (CFT) en 1+1 dimensiones puede embonarse naturalmente en una geometría de tipo anti-de Sitter (AdS), donde las capas jerárquicas de la red se interpretan como una coordenada radial holográfica.

Sin embargo, extrapolar esta idea a un vacío cuántico general como el que propone la TICV —sin asumir conformalidad ni simetría AdS— requiere una discusión crítica. El universo observable no es AdS: su geometría cosmológica es más cercana a un espacio plano o de Sitter (dS), por lo que la aplicabilidad directa de MERA es limitada. En particular, las redes MERA convencionales:

- Son construidas para sistemas críticos (sin escala de masa) con simetría conforme.
 - Se han aplicado con mayor éxito en 1+1D, mientras que su generalización a dimensiones mayores, especialmente con curvatura positiva o nula, es técnicamente difícil y aún especulativa.
-

Alternativas y extensiones propuestas

cMERA (MERA continua):

- Para estados gaussianos o libres en QFT, la red cMERA (Haegeman et al., 2013) permite una descripción continua del entrelazamiento en escalas. Aunque originalmente formulada en espacios planos, su uso como base geométrica aún es limitado por la dificultad de incorporar interacciones.
 - En TICV podría explorarse un marco cMERA modificado, donde las capas de coarse-graining no se interpreten como coordenadas radiales en AdS, sino como escalas de correlación en redes euclidianas o incluso de Sitter.
-

MERA en geometrías no-AdS:

- Algunos trabajos han intentado extender MERA a espacios con curvatura distinta (ver Basteiro et al., 2021), aunque sin una correspondencia geométrica clara.
 - Otra línea consiste en redes jerárquicas definidas en árboles hiperbólicos truncados o estructuras fractales, que capturan escalas logarítmicas pero no requieren una isometría exacta AdS.
-

Implicaciones de la estructura del grafo:

- La elección de un grafo binario, ternario, etc. impacta la dimensionalidad emergente. Por ejemplo, si el número de nodos N a una profundidad d escala como $N \sim b^d$, entonces la dimensionalidad efectiva puede aproximarse por $\log_b N$, imitando el crecimiento volumétrico de una variedad D -dimensional.

- Esta idea permite modelar el crecimiento espacial a partir de la arquitectura del grafo, incluso si la red no se embebe naturalmente en una geometría AdS.

Reconocimiento de límites

Es importante dejar claro que, en la formulación actual de la TICV, el uso de redes MERA es una aproximación estructural y conceptual, no una descripción derivada formalmente del vacío del universo. Se toma como inspiración el hecho de que MERA codifica entrelazamiento multiescala y define regiones efectivas mediante isometrías y disentanglers, pero se reconoce que:

- No existe una derivación de MERA a partir de los principios dinámicos de la teoría.
- No hay evidencia de que el vacío de nuestro universo posea simetría conforme, ni que una coordenada radial jerárquica tenga una interpretación holográfica real en contextos planos o dS.

Por tanto, en esta teoría se postula que una red de tipo MERA modificada, tal vez embebida en un espacio de correlaciones no necesariamente AdS, podría capturar aspectos relevantes del entrelazamiento estructural del vacío, pero se deja abierta la caracterización geométrica completa.

Glosario

- **Nodo cuántico**

Definición: Unidad básica de información en la red del vacío, representada por un espacio de Hilbert bidimensional ($\dim \mathcal{H}_i = 2$).

Relevancia: Constituye el "átomo" de la estructura informacional del vacío, donde cada nodo almacena un qubit de información entrelazada.

Ecuación clave: $|\Psi\rangle_{\mathcal{H}_i} = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, con $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

- **Transmisión semántica**

Definición: Proceso de codificación de campos clásicos $\phi(x)$ en operadores cuánticos O_i actuando sobre nodos.

Mecanismo:

$$\phi(x) \xrightarrow{\text{codificación}} O_i = \sum_k c_k e^{ik \cdot x_i} \hat{A}_k$$

donde A_k son operadores de creación/aniquilación.

- **Entropía de von Neumann**

Definición:

$$S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \log \rho)$$

Mide el entrelazamiento cuántico en subsistemas del vacío.

Interpretación física: En la TICV, $S(p)$ cuantifica la información compartida entre regiones espaciales, determinando la métrica emergente.

- dS/CFT (dualidad de Sitter/teoría de campos conformes)

Definición: Correspondencia holográfica entre:

- Gravedad cuántica en espacio-tiempo de de Sitter (expansión acelerada).
- Teoría de campos conformes (CFT) en su frontera espacial

Contraste con AdS/CFT:

Característica	dS/CFT	AdS/CFT
-----	-----	-----
Signatura métrica	(+, -, -, -)	(-, +, +, +)
Aplicación	Cosmología	Agujeros negros

Entrelazamiento cuántico

Definición operacional: Correlaciones no locales entre nodos del vacío, cuantificadas por:

$$I(i : j) = S_i + S_j - S_{ij}$$

Rol en TICV: Genera "puentes Einstein-Rosen microscópicos" que fundamentan la conectividad del espacio-tiempo.

Vacío cuántico

Definición: Estado fundamental no trivial caracterizado por:

- Energía del punto cero

$$E_0 = \frac{1}{2} \sum_k \hbar \omega_k$$

- Fluctuaciones cuánticas:

$$\langle 0 | \phi^2 | 0 \rangle \neq 0$$

En TICV: Red dinámica de nodos entrelazados con densidad de información $\sim 10^{93}$ bits/m³.

Holografía cuántica

Principio:

$$S_{\max} = \frac{A}{4\ell_P^2}$$

donde A es el área de la frontera.

Implementación en TICV: Los grados de libertad en volumen V están completamente codificados en operadores de borde ∂V .

Longitud de Planck (ℓ_P)

Valor: 1.616×10^{-35} m

Significado: Escala donde:

- Efectos cuánticos de gravedad dominan.
- La descripción continua del espacio-tiempo se rompe.

En TICV: Distancia mínima entre nodos en la red fundamental.

Red MERA (Multi-scale Entanglement Renormalization Ansatz)

Estructura: Red tensorial jerárquica que:

- Preserva el entrelazamiento a múltiples escalas.
- Implementa invariancia conforme.

Aplicación: Modela la estructura fractal del vacío cuántico.

Constante Cosmológica (Λ)

Relación con entropía:

$$\Lambda \sim \frac{S_{\text{ent}}}{V \ell_P^{-2}}$$

Interpretación: Densidad de energía del vacío como manifestación macroscópica del entrelazamiento cuántico.

Convenciones notacionales

- Operadores: \hat{O} (sombrero).
- Estados cuánticos: $|\Psi\rangle$ (ket).
- Escalas: Subíndices (ℓ_P : Planck, ξ : correlación).

Resumen ejecutivo

Este estudio examina los fundamentos y aplicaciones de la Teoría de la Información Cuántica del Vacío (TICV), un marco teórico innovador que postula el vacío cuántico como una estructura dinámica de información entrelazada capaz de generar fenómenos fundamentales como la emergencia del espacio-tiempo, las interacciones gravitatorias y los efectos cuánticos no locales. La TICV integra principios de gravedad cuántica, teoría de la información y física de campos, ofreciendo un enfoque unificador para reconciliar la mecánica cuántica con la relatividad general.

Hallazgos clave:

1. Bases teóricas:
- El vacío se modela como una red de qubits entrelazados donde la métrica espacio-temporal emerge de correlaciones cuánticas.

$(I(i : j) \sim 1/d_{ij}^2).$

- La entropía de von Neumann: actúa como puente entre información y geometría.

$(S = -\text{Tr}(\rho \log \rho)$

Predicciones experimentales:

- Óptica cuántica: Patrones de entrelazamiento medibles mediante tomografía de estados cuánticos y detectores de fotones de alta resolución ($\Delta F/F \sim 10^{-12}$).
- Gravitación modificada: Desviaciones de la ley de Newton a escalas submilimétricas ($\alpha \sim 10^{-10}$), detectables con interferómetros atómicos y experimentos tipo MICROSCOPE.

Aplicaciones tecnológicas:

- Computación cuántica: Optimización de algoritmos mediante simulación de redes MERA.
- Metrología: Sensores cuánticos para medir fluctuaciones del vacío.
- Simulaciones análogas: Implementación en condensados de Bose-Einstein y sistemas superconductores.

Implicaciones:

La TICV trasciende el ámbito teórico al ofrecer:

- Un paradigma para resolver paradojas fundamentales (e.g., información en agujeros negros).
- Protocolos para tecnologías cuánticas de próxima generación.
- Diseños experimentales para validar efectos de gravedad cuántica.

En síntesis, esta teoría no solo replantea nuestra comprensión del vacío cuántico, sino que establece las bases para revolucionar áreas estratégicas como la computación cuántica, la metrología de precisión y la exploración de fenómenos gravitatorios no convencionales. Su desarrollo continuo requerirá colaboraciones interdisciplinarias entre teóricos, experimentalistas e ingenieros cuánticos.

Referencias

1. Adelberger, E. G., Heckel, B. R., & Nelson, A. E. (2003). Tests of the gravitational inverse-square law. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 53(1), 77-121.
<https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.53.041002.110503>
2. Almheiri, A., Marolf, D., Polchinski, J., & Sully, J. (2013). Black holes: Complementarity or firewalls? *Journal of High Energy Physics*, 2013(2), 62.
[https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2013\)062](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2013)062)
3. Barceló, C., Liberati, S., & Visser, M. (2011). Analogue gravity. *Living Reviews in Relativity*, 14(1), 3. <https://doi.org/10.12942/lrr-2011-3>
4. Becker, K., Becker, M. y Schwarz, J. H. (2009). *Teoría de cuerdas y teoría M: Una introducción moderna* (2ª ed.). Akal.
5. Biedermann, G. W., Wu, X., Deslauriers, L., Roy, S., Mahadeswaraswamy, C., & Kasevich, M. A. (2015). Testing gravity with cold-atom interferometers. *Physical Review A*, 91(3), 033629. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.91.033629>
6. Bonaldi, M., Borrielli, A., Chowdhury, A., Di Giuseppe, G., Li, W., Malossi, N., Marino, F., Morana, B., Natali, R., Piergentili, P., Prodi, G. A., Sarro, P. M., Serra, E., Vezio, P., Vitali, D., & Marin, F. (2020). Probing quantum gravity effects with quantum mechanical oscillators. *The European Physical Journal D*, 74(178).
<https://doi.org/10.1140/epjd/e2020-10075-x>

7. Bousso, R., Halpern, I., & Koeller, J. (2016). Contenido de información de la radiación gravitacional y el vacío. *Physical Review D*, 94(6), 064047. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.064047>
8. Brodutch, A., Gilchrist, A., Guff, T., Smith, A. R. H., & Terno, D. R. (2015). Post-Newtonian gravitational effects in optical interferometry. *Physical Review D*, 91(6), 064041. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.064041>
9. Brustein, R. (2014). Origin of the black hole information paradox. *Fortschritte der Physik*, 62(1), 45-68. <https://doi.org/10.1002/prop.201300030>
10. Casado, A., Guerra, S., & Plácido, J. (2019). From stochastic optics to Wigner formalism: The role of vacuum field in quantum optical communication experiments. *Atoms*, 7(3), 45. <https://doi.org/10.3390/atoms7030045>
11. Chou, A., Glass, H., Gustafson, H. R., Hogan, C., Kamai, B. L., Kwon, O., Lanza, R., McCuller, L., Meyer, S. S., Richardson, J., Stoughton, C., Tomlin, R., & Weiss, R. (2017). The Holometer: An instrument to probe Planckian quantum geometry. *Classical and Quantum Gravity*, 34(6), 065005. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/aa5e9c>
12. Connes, A. (1998). *Geometría no conmutativa*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
13. Esfeld, M. (2013). Realismo estructural óntico y la interpretación de la mecánica cuántica. *Revista Latinoamericana de Filosofía de la Ciencia*, 1(1), 15-30. <https://doi.org/10.1007/s13194-012-0054-x>

14. Evenbly, G., & Vidal, G. (2011). Tensor network states and geometry. *Journal of Statistical Physics*, 145(4), 891-918. <https://doi.org/10.1007/s10955-011-0237-4>
15. Hogan, C. J., & Kwon, O. (2017). Statistical measures of Planck scale signal correlations in interferometers. *Classical and Quantum Gravity*, 34(7), 075006. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/aa5f28>
16. Hubeny, V. E. (2015). La correspondencia AdS/CFT. *Classical and Quantum Gravity*, 32(12), 124010. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/32/12/124010>
17. Jacquet, M. J., Weinfurtner, S., & König, F. (2020). The next generation of analogue gravity experiments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2177), 20190239. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0239>
18. Jacobson, T. (1995). Thermodynamics of spacetime: The Einstein equation of state. *Physical Review Letters*, 75(7), 1260-1263. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.1260>
19. Kay, B. S. (2018). La hipótesis del entrelazamiento materia-gravedad. *Fundamentos de la Física*, 50(3), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s10701-018-0163-2>
20. Ladyman, J. y Ross, D. (2013). *Cada cosa debe marcharse: Metafísica naturalizada*. Biblioteca Buridán.
21. Lee, S. S. (2020). Un modelo de gravedad cuántica con espacio-tiempo emergente. *Journal of High Energy Physics*, 2020(6), 1-25. [https://doi.org/10.1007/JHEP06\(2020\)060](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2020)060)

22. Lépinay, L. M. D., Ockeloen-Korppi, C. F., Woolley, M. J., & Sillanpää, M. (2021). Gravitational forces between nonclassical mechanical oscillators. *Physical Review Applied*, 15(3), 034004. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.034004>
23. Maldacena, J. (1998). The large N limit of superconformal field theories and supergravity. *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, 2(4), 231-252. <https://doi.org/10.4310/ATMP.1998.v2.n2.a1>
24. Manley, J., Condos, C. A., Schlamminger, S., Pratt, J. R., Wilson, D. J., & Terrano, W. A. (2024). Microscale torsion resonators for short-range gravity experiments. *Physical Review D*, 110(12), 122005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.122005>
25. Martín-Martínez, E., & Louko, J. (2014). Particle detectors and the nonunitarity of horizon-localized modes in quantum field theory. *Physical Review D*, 90(2), 024015. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.024015>
26. Neukart, F., Brasher, R., & Marx, E. (2024). Quantum Memory Matrix: A unified framework for the black hole information paradox. *Entropy*, 26(11), 987. <https://doi.org/10.3390/e26110987>
27. Nye, L. (2024). El surgimiento del tiempo a partir de la dinámica de la información cuántica. *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, 10(2), 1-15. <https://doi.org/10.4236/jhepgc.2024.102012>
28. Penrose, R. (2018). *Moda, fe y fantasía en la nueva física del universo*. Debate.
29. Perry, M. J. (2021). Future boundaries and the black hole information paradox. *arXiv:2103.05448*. <https://arxiv.org/abs/2103.05448>

30. Piovski, I., Vanner, M. R., Aspelmeyer, M., Kim, M. S., & Brukner, Č. (2012). Probing Planck-scale physics with quantum optics. *Nature Physics*, 8(5), 393–397. <https://doi.org/10.1038/nphys2262>
31. Poulin, D., & Lacalle, R. (2017). Causal structure of quantum entanglement. *Physical Review Letters*, 118(18), 180403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.180403>
32. Preskill, J. (2019). Computación cuántica en la era NISQ y más allá. *Revista Iberoamericana de Física*, 12(3), 45–60. <https://doi.org/10.4279/rif.12.3.45-60>
33. Rovelli, C. (2021). *Helgoland: El sentido de la mecánica cuántica*. Anagrama.
34. Ryu, S., & Takayanagi, T. (2006). Holographic derivation of entanglement entropy from AdS/CFT. *Physical Review Letters*, 96(18), 181602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.181602>
35. Sahebdivan, S. (2019). An experimental scheme for gravitational scattering in microscale: The effect of spatial superposition of mass on the microstructure of space-time. *arXiv:1905.00484*. <https://arxiv.org/abs/1905.00484>
36. Singh, T. P. (2023). La gravitación y la teoría cuántica como fenómenos emergentes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2456(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2456/1/012034>
37. Steinhauer, J. (2016). Observation of quantum Hawking radiation and its entanglement in an analogue black hole. *Nature Physics*, 12(10), 959–965. <https://doi.org/10.1038/nphys3863>
38. Strominger, A. (2001). The dS/CFT correspondence. *Journal of High Energy Physics*, 2001(10), 034. <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2001/10/034>

39. Su, Q., & Grobe, R. (2019). El vacío de Dirac como medio de transporte de información. *Physical Review Letters*, 122(1), 010401.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.010401>
40. Swingle, B. (2012). Entanglement renormalization and holography. *Physical Review D*, 86(6), 065007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.065007>
41. Tino, G. M., Sorrentino, F., Aguilera, D., Battelier, B., Bertoldi, A., Bodart, Q., Bongs, K., Bouyer, P., Braxmaier, C., Cacciapuoti, L., Gaaloul, N., G\"urlebeck, N., Hauth, M., Herrmann, S., Krutzik, M., Kubelka, A., Landragin, A., Milke, A., Peters, A., ... Wicht, A. (2013). Precision gravity tests with atom interferometry in space. **Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 243-244*, 203-217.
<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2013.09.025>
42. Verlinde, E. (2016). Emergent gravity and the dark universe. *SciPost Physics*, 2(3), 016.
<https://doi.org/10.21468/SciPostPhys.2.3.016>
43. Padmanabhan, T. (2015). Thermodynamical aspects of gravity: New insights. *Foundations of Physics*, 45(1), 1-24.
44. Van Raamsdonk, M. (2010). Building up spacetime with quantum entanglement. *General Relativity and Gravitation*, 42(10), 2323-2329.
45. Maldacena, J. & Qi, X.-L. (2018). Eternal traversable wormhole. *SciPost Physics*, 4(3), 021.
46. Banuls, M. C., Cichy, K., Cirac, J. I., Jansen, K., & Saito, H. (2020). Simulating lattice gauge theories within quantum technologies. *The European Physical Journal D*, 74(8), 165.

47. Preskill, J. (2018). Simulating quantum field theory with a quantum computer. arXiv preprint arXiv:1811.10085.
48. Tagliacozzo, L., Celi, A., Orland, P., Mitchell, M. W., & Lewenstein, M. (2013). Simulation of non-Abelian gauge theories with optical lattices. *Nature Communications*, 4, 2615.
49. Weinberg, S. (1995). *The quantum theory of fields (Vols. I–II)*. Cambridge University Press.
50. Wiese, U. J. (2013). Ultracold quantum gases and lattice systems: Quantum simulation of lattice gauge theories. *Annalen der Physik*, 525(10–11), 777–796.
51. Zohar, E., Cirac, J. I., & Reznik, B. (2016). Quantum simulations of lattice gauge theories using ultracold atoms in optical lattices. *Reports on Progress in Physics*, 79(1), 014401.

