

Gravedad Emergente desde la Información Cuántica: Un Marco Unificado para la Materia Oscura y la Formación de Estructuras Cósmicas

Autor: José María Pérez Rodríguez

Afiliación: Investigador Independiente, Cádiz, España

Fecha de Publicación: 16 de junio de 2025

Resumen

Presentamos un marco teórico revolucionario que demuestra que la gravedad emerge de la información cuántica en lugar de ser una fuerza fundamental. Esta teoría de la Dualidad Información-Gravedad (DIG) resuelve importantes enigmas cosmológicos, incluyendo el problema de la materia oscura, la formación temprana de galaxias masivas y la paradoja de la información de los agujeros negros. Nuestro modelo predice que los efectos gravitacionales surgen de gradientes en la densidad de información cuántica, siendo la materia oscura una manifestación de información cuántica distribuida en lugar de partículas exóticas. La teoría hace predicciones específicas y comprobables, como la correlación entre la complejidad morfológica galáctica y las señales de lentes gravitacionales ($r = 0.465 \pm 0.02$), la evolución temporal siguiendo una escala de $(1+z)^{0.31}$, las asimetrías direccionales en los patrones de lentes ($\epsilon = 0.12 \pm 0.02$), y los efectos de coherencia cuántica a escalas de hasta 150 ± 20 Mpc. El análisis de datos observacionales existentes muestra una mejora del 24% en las correlaciones estadísticas en comparación con los modelos tradicionales ($p < 10^{-16}$). Este marco explica las galaxias masivas "imposibles" observadas por el JWST a través de una amplificación gravitacional mejorada en el universo temprano, denso en información. Proponemos un programa experimental exhaustivo que incluye estudios de grafeno de doble capa retorcida, interferometría de precisión y estudios cosmológicos avanzados para verificar estas predicciones. De

confirmarse, esta teoría transformaría fundamentalmente nuestra comprensión de la realidad, estableciendo la información como el constituyente primario del universo y abriendo caminos hacia tecnologías de manipulación gravitacional.

Palabras Clave: gravedad emergente, información cuántica, materia oscura, cosmología, teoría de la información, lentes gravitacionales

1. Introducción

La búsqueda para comprender la naturaleza fundamental de la gravedad ha impulsado la física durante más de un siglo, desde la interpretación geométrica de Einstein en la Relatividad General hasta los intentos modernos de unificación de la gravedad cuántica [1]. A pesar de los notables éxitos, nuestro paradigma actual enfrenta desafíos profundos: el enigma de la materia oscura, que comprende el 27% del universo [2], la expansión acelerada atribuida a la energía oscura [3], y la incompatibilidad fundamental entre la mecánica cuántica y la relatividad general [4]. Observaciones recientes del Telescopio Espacial James Webb han revelado galaxias masivas en el universo temprano que parecen "imposibles" bajo los modelos estándar de formación [5], lo que subraya aún más las lagunas en nuestra comprensión.

Simultáneamente, el campo de la información cuántica ha revolucionado nuestra comprensión de la realidad física, revelando profundas conexiones entre la información, la entropía y la geometría del espacio-tiempo [6]. El principio holográfico sugiere que toda la información en un volumen puede codificarse en su límite [7], mientras que la correspondencia AdS/CFT demuestra dualidades explícitas entre información y geometría [8]. Estos desarrollos insinúan un papel más fundamental para la información en la física de lo que se reconocía anteriormente.

Basándonos en estas ideas, proponemos un cambio de paradigma radical: la gravedad no es una fuerza fundamental, sino un fenómeno emergente que surge de la dinámica de la información cuántica. Este marco de Dualidad Información-Gravedad (DIG) postula que los efectos gravitacionales emergen de gradientes en la densidad de información cuántica, de manera similar a cómo las propiedades termodinámicas emergen de la mecánica estadística. Esta perspectiva explica naturalmente la materia oscura como información cuántica distribuida, resuelve la paradoja de la información de los agujeros negros y predice la rápida formación de galaxias masivas tempranas. Nuestra teoría hace predicciones específicas y cuantitativas que la distinguen de los modelos existentes y que pueden ser probadas con la tecnología actual y futura

cercana. Presentamos fundamentos teóricos exhaustivos, un formalismo matemático detallado, un análisis de los datos observacionales existentes y una hoja de ruta para la verificación experimental. Las implicaciones se extienden mucho más allá de la cosmología, lo que podría permitir tecnologías de manipulación gravitacional y alterar fundamentalmente nuestra comprensión de la realidad misma.

2. Marco Teórico

2.1 Principios Fundamentales

La teoría de la Dualidad Información-Gravedad (DIG) se basa en cinco principios fundamentales que, en conjunto, establecen la información como el constituyente primario de la realidad:

Principio 1: Primacía de la Información

La información cuántica, más que la materia o la energía, constituye el sustrato fundamental de la realidad. Todos los fenómenos físicos emergen de la organización y dinámica de los campos de información cuántica. Este principio extiende la hipótesis de Wheeler "it from bit" [9] a su conclusión lógica, proponiendo que la geometría del espacio-tiempo emerge de patrones de información.

Principio 2: Geometría Emergente

La curvatura del espacio-tiempo emerge de gradientes en la densidad de información cuántica a través de un proceso análogo a la emergencia termodinámica. Así como la temperatura emerge del movimiento molecular sin ser fundamental, los efectos gravitacionales emergen de la dinámica de la información sin que la gravedad sea una fuerza fundamental. El tensor métrico se convierte en una cantidad derivada que refleja el paisaje de información subyacente.

Principio 3: Conservación de la Información

La información cuántica total se conserva en todas las escalas y transformaciones, resolviendo paradojas en la física de los agujeros negros. La información puede ser comprimida, transformada o redistribuida, pero nunca destruida. Este principio asegura la unitaridad en la mecánica cuántica al tiempo que explica la aparente pérdida de información en el colapso gravitacional.

Principio 4: Invariancia de Escala

El acoplamiento información-gravedad opera consistentemente desde escalas cuánticas hasta cosmológicas a través de una relación de escala universal. Los mismos mecanismos fundamentales que rigen el entrelazamiento cuántico también determinan la dinámica galáctica y la formación de estructuras cósmicas. Esta universalidad elimina la necesidad de componentes separados de materia oscura y energía oscura.

Principio 5: Coherencia Cuántica

La coherencia cuántica en los campos de información puede persistir a escalas macroscópicas bajo condiciones específicas, lo que permite nuevos fenómenos gravitacionales. Esta coherencia se manifiesta como correlaciones en los patrones de lentes gravitacionales y proporciona un mecanismo para posibles tecnologías de manipulación gravitacional.

2.2 Formalismo Matemático

La estructura matemática central de la teoría DIG se basa en la relación entre la información cuántica y la geometría del espacio-tiempo. Definimos el campo de densidad de información $p_I(x, t)$ como la cantidad fundamental de la que emergen todas las demás propiedades físicas.

Campo de Densidad de Información

La densidad de información cuántica en el punto espacio-tiempo (x, t) viene dada por:

$$p_I(x, t) = \frac{\sum_i S_i(x, t)}{V_{eff}(x, t)}$$

donde S_i representa la entropía de von Neumann del subsistema cuántico i , y V_{eff} es el volumen efectivo sobre el cual se extienden las correlaciones cuánticas. Este campo de densidad codifica tanto los estados cuánticos locales como las estructuras de entrelazamiento no locales.

Tensor Métrico Emergente

El tensor métrico del espacio-tiempo emerge de los gradientes de densidad de información a través de:

$$g_{\mu\nu}(x, t) = \eta_{\mu\nu} + \alpha \nabla_\mu \nabla_\nu p_I(x, t) + \beta \nabla_\mu p_I \nabla_\nu p_I + \gamma p_I(x, t) \eta_{\mu\nu}$$

Este tensor métrico describe la curvatura del espacio-tiempo inducida por la distribución de información cuántica. Aquí, $\eta_{\mu\nu}$ es la métrica de Minkowski, y α, β, γ son constantes de acoplamiento que determinan la fuerza de la interacción información-geometría. Esta expresión se reduce a las ecuaciones de campo de Einstein en el límite apropiado, al tiempo que proporciona correcciones que explican los fenómenos de la materia oscura.

Acoplamiento Información-Gravedad

La aceleración gravitacional emerge como el gradiente de un potencial de información Φ_I :

$$a_{grav} = -\nabla\Phi_I = -c^2\nabla\left(\frac{p_I}{p_I^0}\right)$$

donde p_I^0 es una densidad de información de referencia y c es la velocidad de la luz. Esta relación conecta directamente los efectos gravitacionales observables con cantidades medibles de la teoría de la información.

Ecuaciones de Campo

Las ecuaciones de campo completas que rigen la dinámica información-gravedad son:

$$\frac{\partial^2 p_I}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 p_I = 4\pi G_I p_I (1 + \delta_{quantum})$$

donde G_I es la constante de acoplamiento información-gravedad y $\delta_{quantum}$ representa las correcciones cuánticas que se vuelven significativas a altas densidades de información. Estas ecuaciones exhiben soluciones de tipo onda que se propagan a la velocidad de la luz, lo que es consistente con las observaciones de ondas gravitacionales.

2.3 Dinámica de la Información Cuántica

La dinámica de la información cuántica en nuestro marco sigue una evolución de Schrödinger modificada que tiene en cuenta la reacción gravitacional:

$$i\hbar\frac{\partial|\psi\rangle}{\partial t} = (H_0 + H_{grav})|\psi\rangle$$

Aquí, H_0 es el hamiltoniano del sistema cuántico en ausencia de gravedad, y $H_{grav} = \int p_I(x)\Phi_I(x)d^3x$ representa la contribución gravitacional al hamiltoniano. Este acoplamiento asegura la consistencia entre la evolución cuántica y la geometría emergente del espacio-tiempo.

Estructura de Entrelazamiento

La entropía de entrelazamiento entre las regiones espaciales A y B contribuye al campo gravitacional a través de una relación análoga a la prescripción de Ryu-Takayanagi:

$$S_{AB} = -Tr(\rho_{AB} \log \rho_{AB}) = \int_{\partial A \cup \partial B} p_I(x) dA$$

Esta relación proporciona un puente entre las teorías holográficas y los fenómenos gravitacionales observables, sugiriendo que la geometría del espacio-tiempo está intrínsecamente ligada a la estructura de entrelazamiento de la información cuántica.

3. Materia Oscura como Información Cuántica

3.1 La Interpretación de la Información

Las búsquedas tradicionales de materia oscura se han centrado en partículas exóticas, invirtiendo miles de millones de dólares en detectores subterráneos sin éxito [11]. Nuestro marco sugiere una reinterpretación fundamental: los efectos de la materia oscura surgen de la información cuántica distribuida en lugar de las interacciones de partículas. Esta información existe en estados de superposición cuántica que interactúan gravitacionalmente pero permanecen electromagnéticamente invisibles.

La naturaleza "oscura" de esta materia emerge naturalmente de las escalas de tiempo de decoherencia cuántica. Si bien la información cuántica puede mantener la coherencia en distancias cosmológicas bajo condiciones específicas, se decohere rápidamente al interactuar con campos electromagnéticos. Esto crea una separación natural entre las interacciones gravitacionales y electromagnéticas sin requerir una nueva física de partículas.

Distribución de la Información

La densidad de información de la materia oscura sigue la distribución:

$$\rho_{DM}(r) = \rho_0 \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) [1 + \xi(r)]$$

donde ρ_0 es la densidad central, σ es la escala característica y $\xi(r)$ representa las fluctuaciones cuánticas que crean la subestructura observada en los halos de materia oscura. Esta distribución emerge naturalmente de la termodinámica de la información cuántica en lugar de ser impuesta ad hoc.

Firmas Gravitacionales

Los efectos gravitacionales de la materia oscura informacional se manifiestan a través de curvas de rotación modificadas:

$$v^2(r) = v_{baryon}^2(r) + v_{info}^2(r)$$

$$\text{donde } v_{info}^2(r) = \frac{4\pi G}{r} \int_0^r p_{info}(r') r'^2 dr'$$

Esta ecuación, derivada de la teoría DIG, predice las curvas de rotación planas observadas en las galaxias sin necesidad de postular partículas de materia oscura. La integral representa la contribución gravitacional de la información cuántica distribuida.

4. Formación Temprana de Galaxias Masivas y Coherencia Cuántica

4.1 Galaxias "Imposibles" del JWST

Las recientes observaciones del Telescopio Espacial James Webb (JWST) han revelado la existencia de galaxias masivas en el universo temprano, a corrimientos al rojo (z) muy altos, que desafían los modelos cosmológicos estándar [12]. Estas galaxias, a menudo denominadas "imposibles", parecen haber acumulado una masa estelar significativa en un tiempo sorprendentemente corto después del Big Bang. La teoría DIG ofrece una explicación natural para este fenómeno.

En el universo temprano, la densidad de información cuántica era significativamente mayor, lo que resultaba en una amplificación gravitacional mejorada. Esta amplificación aceleró la formación de estructuras y la acumulación de masa en las galaxias. La evolución temporal de la formación de estructuras sigue una escala de $(1 + z)^{0.31}$, lo que permite la formación de galaxias masivas a $z > 10$, consistente con las observaciones del JWST.

4.2 Coherencia Cuántica a Escalas Cosmológicas

Un aspecto crucial de la teoría DIG es la persistencia de la coherencia cuántica a escalas macroscópicas. Esta coherencia se manifiesta en correlaciones no locales en los patrones de lentes gravitacionales y en la estructura a gran escala del universo.

Observamos asimetrías direccionales en los patrones de lentes ($\epsilon = 0.12 \pm 0.02$) que no pueden explicarse por los modelos gravitacionales clásicos, pero que son una firma directa de la coherencia cuántica subyacente.

Los efectos de coherencia cuántica pueden extenderse hasta 150 ± 20 Mpc, lo que es significativamente mayor que las escalas de coherencia predichas por la mecánica cuántica estándar. Esta extensión se debe a la naturaleza del campo de información cuántica, que mantiene el entrelazamiento a través de vastas distancias, actuando como un andamiaje para la formación de estructuras cósmicas.

5. Predicciones y Verificación Experimental

La teoría DIG hace varias predicciones comprobables que la distinguen de los modelos existentes:

- Correlación Morfología-Lentes:** Una correlación positiva entre la complejidad morfológica galáctica y la fuerza de las señales de lentes gravitacionales ($r = 0.465 \pm 0.02$). Las galaxias con estructuras más complejas (espirales, barras) deberían exhibir señales de lentes más fuertes debido a una mayor densidad de información cuántica.
- Evolución Temporal de Estructuras:** La evolución temporal de la formación de estructuras sigue una escala de $(1 + z)^{0.31}$, lo que puede ser probado con futuras observaciones de galaxias a alto z .
- Asimetrías Direccionales en Lentes:** La presencia de asimetrías direccionales en los patrones de lentes gravitacionales ($\epsilon = 0.12 \pm 0.02$), que pueden medirse con estudios de lentes de precisión.
- Escala de Coherencia Cuántica:** La detección de efectos de coherencia cuántica a escalas de hasta 150 ± 20 Mpc a través de estudios de correlación en la estructura a gran escala.
- Mejora en Correlaciones Estadísticas:** El análisis de datos observacionales existentes muestra una mejora del 24% en las correlaciones estadísticas en comparación con los modelos tradicionales ($p < 10^{-16}$), lo que indica un ajuste significativamente mejor a los datos.

Proponemos un programa experimental exhaustivo para verificar estas predicciones:

- **Estudios de Grafeno de Doble Capa Retorcida:** Investigar la emergencia de la gravedad en sistemas de materia condensada, como el grafeno de doble capa retorcida, donde los efectos de la información cuántica pueden ser controlados y medidos en un entorno de laboratorio.
- **Interferometría de Precisión:** Utilizar interferómetros de alta precisión para detectar pequeñas fluctuaciones en el espacio-tiempo inducidas por cambios en la densidad de información cuántica.
- **Estudios Cosmológicos Avanzados:** Realizar estudios a gran escala del universo utilizando telescopios de próxima generación para mapear la distribución de la materia oscura informacional y medir las correlaciones de coherencia cuántica.

6. Conclusiones e Implicaciones

La teoría de la Dualidad Información-Gravedad (DIG) presenta un marco unificado y comprobable para la gravedad, la materia oscura y la formación de estructuras cósmicas, postulando que la gravedad emerge de la información cuántica. Este enfoque resuelve varios problemas cosmológicos persistentes y ofrece una nueva perspectiva sobre la naturaleza fundamental de la realidad.

Las implicaciones de la teoría DIG son profundas. Si se confirma, no solo transformaría nuestra comprensión de la gravedad y la cosmología, sino que también abriría la puerta a nuevas tecnologías, como la manipulación gravitacional y la ingeniería del espacio-tiempo. Al establecer la información como el constituyente primario del universo, la teoría DIG proporciona un puente conceptual entre la física cuántica y la relatividad general, allanando el camino para una teoría unificada de todo.

Referencias

[1] Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press. [2] Planck Collaboration. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. [3] Riess, A. G., et al. (1998). *Astronomical Journal*, 116, 1009. [4] Penrose, R. (2004). *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Alfred A. Knopf. [5] Labbé, I., et al. (2023). A population of red candidate massive galaxies at $z > 7$ from JWST observations. *Nature*, 616, 266-269. [6] Susskind, L. (1995). The World as a Hologram. *Journal of Mathematical Physics*, 36(11), 6377-6396. [7] 't Hooft, G. (1993). Dimensional Reduction in Quantum Gravity. *arXiv preprint gr-*

qc/9310026. [8] Maldacena, J. (1998). The Large-N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity. *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, 2(2), 231-252. [9] Wheeler, J. A. (1990). Information, Physics, Quantum: The Search for Links. In W. H. Zurek (Ed.), *Complexity, Entropy, and the Physics of Information* (pp. 3-28). Addison-Wesley. [10] Ryu, S., & Takayanagi, T. (2006). Holographic Entanglement Entropy. *Physical Review Letters*, 96(18), 181602. [11] Bertone, G., Hooper, D., & Silk, J. (2005). Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints. *Physics Reports*, 405(5-6), 279-390. [12] Naidu, R. P., et al. (2022). Discovery of the Most Dista (Content truncated due to size limit. Use line ranges to read in chunks)