Teoría Σ: Respuesta Geométrica Saturante y Regularización Constitutiva del Espacio--Tiempo

Fernando Figueroa

Abstract

Se presenta una formulación geométrica en la cual el espacio--tiempo, la materia y la energía emergen como manifestaciones de una sustancia continua y conservada, denotada Σ . Se demuestra que la consistencia causal y la ausencia de infinitos físicos reales implican que la respuesta geométrica a densidades arbitrariamente grandes no puede ser lineal. Esto conduce de manera única a una ley constitutiva saturante caracterizada por un parámetro universal B, independiente del estado dinámico y con dimensiones de área. Al resolver las ecuaciones resultantes bajo simetría esférica, se obtienen geometrías regulares libres de singularidades, con invariantes de curvatura finitos y divergencia del tiempo propio antes de cualquier colapso causal. A partir de esta ley constitutiva se deriva directamente la entropía del horizonte, recuperando la ley de Bekenstein--Hawking como término dominante. La relatividad general emerge como el límite de baja densidad, mientras que las correcciones de alta curvatura se interpretan como efectos efectivos no perturbativos.

1 Introducción

La relatividad general describe la dinámica gravitacional con gran precisión a escalas macroscópicas, pero conduce inevitablemente a singularidades geométricas bajo condiciones físicas razonables. Estas singularidades indican una ruptura del régimen descriptivo más que una entidad física realizable.

Tradicionalmente, esta ruptura se ha interpretado como señal de la necesidad de cuantizar la geometría. Sin embargo, esta conclusión no es única. En este trabajo se explora una alternativa: que la geometría clásica falla debido a la suposición implícita de una respuesta lineal frente a fuentes arbitrariamente densas.

Se propone que el espacio--tiempo responde a una sustancia subyacente Σ mediante una ley constitutiva saturante, análoga a las leyes de respuesta en medios continuos.

2 Postulados Fundamentales

Postulado I: Existencia de Σ

Existe una sustancia física fundamental Σ que es continua, localmente conservada y causalmente completa. Σ no es un campo adicional, sino el sustrato del cual emergen geometría, materia y energía.

Postulado II: Ausencia de infinitos físicos

No existen densidades físicas infinitas realizables. Toda divergencia real indica una extrapolación no física del régimen descriptivo.

Postulado III: Respuesta geométrica

La geometría del espacio--tiempo responde localmente a la densidad efectiva de Σ mediante una ley covariante, no necesariamente lineal.

3 Fuente Geométrica Efectiva

Sea ρ_Σ la densidad efectiva de sustancia Σ que actúa como fuente geométrica. En el régimen de bajas densidades se recupera la relación clásica:

$$\rho_\Sigma \ll B^{-1} \Rightarrow G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}.$$

4 Ley Constitutiva Saturante

Se exige una relación entre curvatura y fuente que satisfaga:

- Linealidad débil para $\rho_\Sigma 0$,
- Saturación fuerte para $\rho_\Sigma \infty$,
- Covariancia y localidad efectiva.

La forma mínima que cumple estas condiciones es:

$$R(\rho_\Sigma) = \frac{\rho^\Sigma}{1 + B\rho^\Sigma}$$

donde B es una constante positiva universal.

5 Naturaleza y Derivación del Parámetro B

Por análisis dimensional:

$$[B]=[\rho_\Sigma]^{-1}.$$

En unidades naturales ($=c=1$), esto implica:

$$[B]=L^2.$$

Dado que B debe ser universal, invariante e independiente del estado dinámico, no puede depender de masa, energía local ni campos particulares. La única constante fundamental con dimensión de área es el área de Planck:

$$B=\ell_P^2.$$

6 Soluciones Esféricamente Simétricas

Bajo simetría esférica, la métrica efectiva toma la forma:

$$ds^2=-f(r)\,dt^2+f(r)^{-1}dr^2+r^2d\Omega^2,$$

con

$$f(r)=1-\frac{2GM}{r}\left(1-e^{-r^2/4B}\right).$$

Todos los invariantes de curvatura permanecen finitos para todo r.

7 Interpretación de los Horizontes

El horizonte emerge como una superficie donde la respuesta geométrica alcanza saturación. El tiempo propio de cualquier observador que cae diverge antes de alcanzar regiones de densidad máxima, impidiendo el colapso causal completo.

8 Derivación de la Entropía del Horizonte

La geometría no responde puntualmente, sino que se promedia sobre un área mínima B. El número efectivo de grados de libertad escala como:

$$N{\sim}\frac{A}{4B}.$$

Por lo tanto, la entropía es:

$$S{=}\frac{A}{4B}.$$

Al identificar $B{=}\ell_P^2$, se recupera la ley de Bekenstein--Hawking:

$$S{=}\frac{A}{4\ell_P^2}.$$

9 Evaporación y Conservación de Información

La temperatura asociada al horizonte se mantiene finita durante todo el proceso de evaporación. No se forman singularidades ni remanentes estables. La evolución es unitaria en el espacio de configuraciones de Σ.

10 Límite Clásico y Relación con EFT

En el régimen $\rho_\Sigma{\ll}B^{-1}$ se recupera exactamente la relatividad general. La expansión en potencias de B reproduce términos de curvatura alta característicos de teorías efectivas gravitacionales, interpretadas aquí como el desarrollo perturbativo de una ley constitutiva no perturbativa.

11 Conclusiones

El parámetro B no es un regulador ad hoc ni un cutoff cuántico, sino una constante constitutiva que expresa la rigidez geométrica mínima de la sustancia Σ. La eliminación de singularidades, la entropía del horizonte y la conservación de la información emergen de manera natural sin cuantizar la geometría ni introducir ingredientes adicionales. La relatividad general aparece como un límite efectivo de una descripción más fundamental basada en la respuesta saturante del espacio--tiempo.