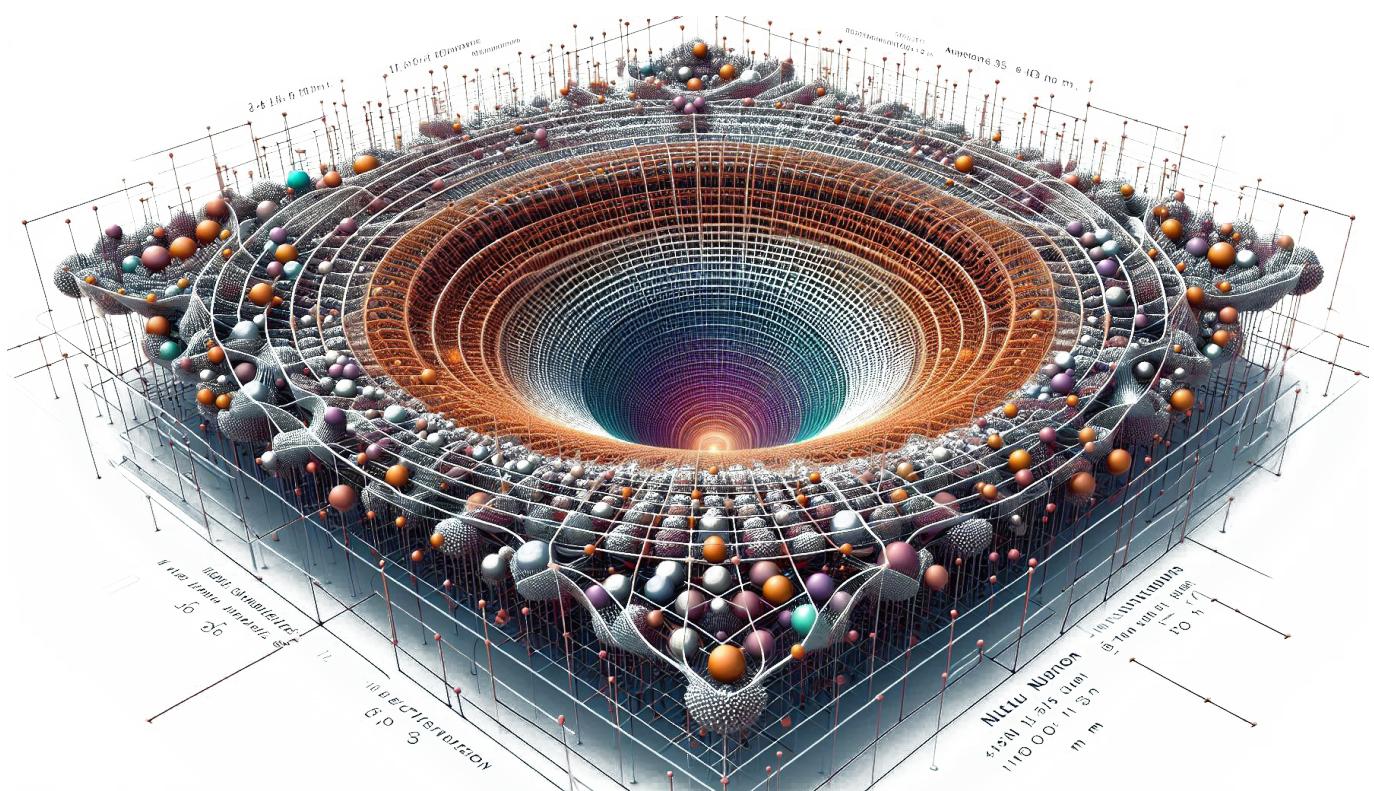


Teoría de la Unificación Discreta

Fundamentos y Geometría Cuántica No Conmutativa

Por: J.A. Grau
Fundamentos Epistémicos de la Física
Estudios Avanzados en Metacognición Artificial
(Afiliación no estándar para física teórica)

7 de abril de 2025
Revisión: 10 de abril de 2025



Introducción

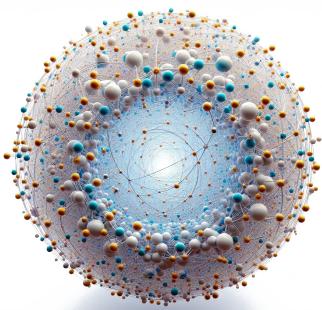
La física contemporánea enfrenta una serie de desafíos fundamentales que trascienden las capacidades explicativas de las teorías existentes. Por un lado, la Relatividad General, exitosa en describir la gravedad y la estructura del espacio-tiempo a gran escala, es incompatible con los principios de la Mecánica Cuántica, que gobierna las interacciones fundamentales a escalas microscópicas. Esta incompatibilidad se manifiesta en la imposibilidad de cuantizar de manera coherente el espacio-tiempo, generando singularidades y divergencias no renormalizables. Por otro lado, problemas como la naturaleza de la materia oscura y la energía oscura, el problema de la jerarquía entre escalas físicas, y la discrepancia entre la energía de vacío teórica y observada, subrayan la necesidad de un marco teórico más profundo y unificado.

En este contexto, la Teoría de Unificación Discreta (TUD) surge como una propuesta para integrar estas problemáticas en un marco único basado en una geometría no commutativa dinámica. Este enfoque redefine la naturaleza del espacio-tiempo, postulando que a escalas fundamentales las coordenadas espacio-temporales dejan de ser parámetros clásicos y se convierten en operadores que obedecen relaciones de conmutación no triviales. El marco de TUD introduce un tensor dinámico de no commutatividad que varía en función de las condiciones físicas locales, permitiendo reconciliar las simetrías globales con los efectos cuánticos y resolviendo inconsistencias teóricas como las divergencias ultravioleta.

La TUD tiene como objetivo abordar directamente algunos de los problemas más persistentes en física. En primer lugar, la naturaleza dinámica de las coordenadas y su tensor asociado introduce una escala de regularización natural que podría explicar la estabilidad de la masa del bosón de Higgs frente a correcciones cuánticas, aportando una posible solución al problema de la jerarquía. Asimismo, propone un mecanismo de cancelación dinámica para la constante cosmológica, derivado de las interacciones entre la no commutatividad del espacio-tiempo, los campos de materia y energía oscura, y los efectos gravitacionales emergentes. Además, la teoría busca ofrecer descripciones precisas para fenómenos asociados con la materia oscura y la energía oscura mediante nuevos potenciales y dinámicas escalares.

Este documento se desarrolla en el marco de los Fundamentos Epistémicos de la Física y Estudios Avanzados en Metacognición Artificial, una iniciativa que explora la interrelación entre humanos e inteligencia artificial (IA) como herramienta clave en el progreso científico. La colaboración entre investigadores y sistemas de IA permite realizar simulaciones complejas, analizar patrones en datos observacionales, y desarrollar hipótesis innovadoras que serían difíciles de formular con enfoques tradicionales. En este sentido, la TUD representa un esfuerzo interdisciplinario que combina teorías físicas fundamentales, geometrías avanzadas y tecnología emergente para expandir las fronteras del conocimiento.

En esta edición revisada y ampliada, se presentan los fundamentos teóricos de la TUD y se analiza su potencial para vincular fenómenos observables con principios teóricos unificados. El desarrollo incluye una evaluación crítica de su consistencia interna, comparaciones con enfoques contemporáneos como la Teoría de Cuerdas y la Gravedad Cuántica de Lazos, y una exploración de los desafíos fenomenológicos y computacionales inherentes. Se establecen predicciones observacionales concretas y mecanismos dinámicos que podrían ser contrastados experimentalmente en el futuro, consolidando el rol de la TUD como una propuesta clave para unificar las leyes fundamentales del universo.



Resumen

La física teórica contemporánea se enfrenta a desafíos conceptuales y observacionales profundos. La incompatibilidad entre la descripción geométrica clásica de la Relatividad General (RG), donde el espacio-tiempo es dinámico, y la naturaleza cuántica de la materia y las interacciones descritas por la Mecánica Cuántica (MC) y la Teoría Cuántica de Campos (QFT) —usualmente formuladas sobre un fondo espaciotemporal fijo— impide una teoría cuántica de la gravedad consistente. Esta tensión se manifiesta en problemas como el tratamiento del tiempo (el "problema del tiempo"), la no renormalizabilidad de la gravedad cuántica perturbativa y la necesidad de reconciliar la dependencia del fondo de la MC con la independencia del fondo de la RG. Adicionalmente, enigmas como la naturaleza de la materia oscura ($\sim 27\%$) y la energía oscura ($\sim 68\%$), componentes dominantes pero desconocidos del contenido energético del cosmos, el problema de la jerarquía (la extrema disparidad entre las escalas Electrodébil M_{EW} y de Planck M_P , y la inestabilidad de la masa del Higgs frente a correcciones cuánticas $\sim \Lambda_{UV}^2$), y el problema de la constante cosmológica (la discrepancia de $\sim 60 - 120$ órdenes de magnitud entre el valor teórico y observado de la energía del vacío, ρ_{vac}) señalan la necesidad de nueva física más allá de la RG y el Modelo Estándar (ME).

Proponemos la Teoría de Unificación Discreta (TUD), un marco teórico fundamentado en la hipótesis de que la estructura del espacio-tiempo a escalas fundamentales (caracterizadas por una escala M_{NC}) es descrita por una geometría no conmutativa (GNC) dinámica. La GNC generaliza la dualidad entre espacios geométricos y álgebras de funciones al ámbito no conmutativo, sugiriendo que la noción clásica de punto podría perder sentido a la escala de Planck. Postulamos que las coordenadas espacio-temporales son reemplazadas por operadores hermíticos \hat{X}^μ que satisfacen la relación de conmutación no trivial $[\hat{X}^\mu, \hat{X}^\nu] = i\hat{\Theta}_{NC}^{\mu\nu}$. Crucialmente, el tensor de no conmutatividad $\hat{\Theta}_{NC}^{\mu\nu}$ no es una constante de fondo (lo que rompería explícitamente la invariancia de Lorentz), sino un campo cuántico dinámico, cuyo valor esperado $\theta_{NC}^{\mu\nu}(x) = \langle \hat{\Theta}_{NC}^{\mu\nu} \rangle$ responde a la distribución de materia-energía y posee su propia dinámica. Esta no conmutatividad implica una relación de incertidumbre fundamental $\Delta X^\mu \Delta X^\nu \geq |\theta_{NC}^{\mu\nu}|/2$, sugiriendo una resolución finita del espacio-tiempo, y actúa como un regulador UV físico natural a la escala M_{NC} .

En la TUD, se postula que la métrica gravitacional $g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$ no es fundamental, sino que emerge como una estructura efectiva a bajas energías ($E \ll M_{NC}$) a partir de la estructura algebraica no conmutativa subyacente (gravedad emergente), proporcionando la conexión con la gravedad observada macroscópicamente. La acción unificada de la TUD, construida sobre este espacio-tiempo no conmutativo, incorpora esta gravedad emergente (incluyendo términos de orden superior como R^2 relevantes para la inflación y la renormalizabilidad), el Modelo Estándar modificado mediante el producto estrella de Moyal (\star) — $\mathcal{L}_{\star\text{SM}}$ — que reemplaza el producto puntual ordinario y naturalmente introduce correcciones dependientes de θ_{NC} y de la energía/momento, generando posibles efectos de Violación de Invariancia de Lorentz (*LIV*) y mezcla UV/IR. La acción también incluye campos candidatos específicos para la materia oscura (un escalar Φ con potencial $V(\Phi)$) y la energía oscura (un escalar tipo quintaesencia Q con potencial $V_Q(Q)$), así como un término \mathcal{L}_Θ (cuya forma específica es crucial para el modelo) que gobierna la dinámica del propio tensor θ_{NC} . Se propone que todos estos componentes se derivan de principios fundamentales de la GNC dinámica, posiblemente relacionados con enfoques como el principio de acción espectral.

Argumentamos que la dinámica intrínseca de la TUD, en particular la del campo $\theta_{NC}^{\mu\nu}$, ofrece mecanismos *plausibles* para resolver problemas clave de la física fundamental. Se *propone* que la mezcla UV/IR inherente a las teorías de campos no conmutativas (NCQFT) o la estructura modificada de los diagramas de bucle *podría* conducir a una supresión exponencial de las correcciones cuánticas a las masas escalares (como m_H), abordando el problema de la jerarquía si M_{NC} es suficientemente baja. Asimismo, se *postula* un mecanismo de cancelación dinámica para la constante cosmológica, basado en la idea de que la interacción entre los campos θ_{NC} , Φ , Q y la gravedad *podría* llevar el sistema cosmológico a un estado atractor con una energía de vacío residual ρ_{vac}^{eff} muy pequeña, cancelando las enormes contribuciones teóricas. La **robustez y viabilidad** de estos mecanismos propuestos es un punto central de análisis en este trabajo y **requiere una validación rigurosa** (ver Apéndices D, F).

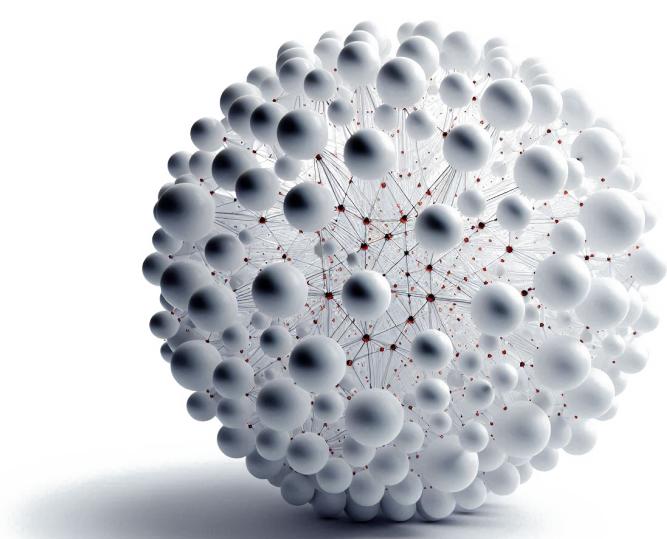
Tabla de Contenidos

Índice

1. Marco Teórico Fundacional	7
1.1. Geometría No Comutativa (GNC) y la Naturaleza Cuántica del Espacio-Tiempo	7
1.1.1. Operadores de Coordenadas y Relación de Incertidumbre	7
1.1.2. El Tensor de No Comutatividad $\hat{\Theta}_{NC}^{\mu\nu}$ y su Dinámica	7
1.2. Métrica Efectiva Emergente	7
1.2.1. Definición Conceptual	7
1.2.2. Interpretación Física	8
1.3. La Acción Unificada de la TUD	8
1.3.1. Principio de Acción y Componentes Fundamentales	8
1.3.2. Sector Gravitacional Modificado ($\mathcal{L}_{\text{grav}}$)	8
1.3.3. Modelo Estándar Extendido ($\mathcal{L}_{\star\text{SM}}$) y el Producto Estrella	9
1.3.4. Sectores Oscuros: Materia Oscura (\mathcal{L}_{DM}) y Energía Oscura (\mathcal{L}_{DE})	9
1.3.5. Inflación Primordial en la TUD ($\mathcal{L}_{\text{infl}}$)	9
1.3.6. Dinámica de $\hat{\Theta}_{NC}^{\mu\nu}$ y Correcciones Explícitas ($\mathcal{L}_{\Theta} + \Delta\mathcal{L}_{\text{NC}}$)	9
2. Mecanismos Dinámicos Clave (Propuestos)	10
2.1. Supresión Exponencial de Correcciones Cuánticas y el Problema de la Jerarquía (Hipótesis)	10
2.1.1. El Mecanismo de Supresión Propuesto	10
2.1.2. Implicaciones para la Masa del Higgs	10
2.1.3. Análisis de Robustez del Mecanismo de Supresión (Necesario)	10
2.2. Cancelación Dinámica de la Constante Cosmológica (Hipótesis)	11
2.2.1. El Problema de la Constante Cosmológica	11
2.2.2. El Mecanismo de Cancelación Dinámica Propuesto en la TUD	11
2.2.3. Comparación Crítica con Otras Soluciones	11
2.2.4. Análisis de Robustez del Mecanismo de Cancelación (Necesario)	11
3. Consistencia Matemática y Estabilidad	12
3.1. Análisis Hamiltoniano y Condición de Energía Positiva	12
3.1.1. Formalismo Hamiltoniano en GNC	12
3.1.2. Estabilidad y Ausencia de Modos Fantasma	12
3.2. Comportamiento Asintótico y Renormalización	12
3.2.1. Renormalizabilidad y Seguridad Asintótica	12
3.2.2. Análisis mediante el Grupo de Renormalización No Perturbativo (NPRG)	12
3.3. Simetrías y Leyes de Conservación: Teorema de Noether No Comutativo	13
4. Interconexión con el Modelo Estándar (ME)	13
4.1. Modificaciones a las Interacciones del ME	13
4.1.1. El Producto Estrella (\star) y su Impacto en Vértices y Propagadores	13
4.1.2. Ejemplo: Vértice $H \rightarrow \gamma\gamma$	13
4.1.3. Otras Modificaciones y Dependencias Fenomenológicas	14
4.2. Renormalización en Teorías de Campos No Comutativas (NCQFT)	14
4.2.1. Regularización y Mezcla UV/IR	14
4.2.2. Diagramas de Feynman en GNC	14

5. Predicciones Observacionales y Contrastación Experimental	14
5.1. Huellas en Cosmología	14
5.1.1. Fondo Cósmico de Microondas (CMB)	14
5.1.2. Estructura a Gran Escala (LSS)	15
5.1.3. Ondas Gravitacionales Primordiales (GW)	15
5.2. Señales en Física de Partículas	15
5.2.1. Colisionadores de Alta Energía (LHC y Futuros)	15
5.2.2. Física de Neutrinos	15
5.2.3. Búsqueda de Materia Oscura (Φ)	15
5.3. Astrofísica y Fenómenos de Alta Energía	16
5.3.1. Rayos Gamma y Cómicos de Ultra Alta Energía (UHECR)	16
5.3.2. Ondas Gravitacionales Astrofísicas	16
5.3.3. Resumen de Pruebas de Violación de la Simetría de Lorentz (<i>LIV</i>)	16
5.3.4. Agujeros Negros Supermasivos y Acreción en TUD (Especulativo)	17
5.3.5. Formación de Galaxias Masivas Tempranas en TUD (Especulativo)	17
5.3.6. Jets Relativistas en TUD (Especulativo)	17
5.4. Análisis Estadístico y Ajuste de Parámetros	17
5.4.1. Metodologías	17
5.4.2. Condiciones Actuales y Escenarios “Benchmark”	18
5.4.3. Tabla Resumen de Parámetros y Sensibilidad (Conceptual)	18
6. Análisis Detallado de Observaciones Clave	18
7. Simulaciones Numéricas y Herramientas Computacionales	19
7.1. Necesidad de Simulaciones en GNC	19
7.2. Métodos Numéricos Adaptados y Desafíos	19
7.3. Software y Plataformas Requeridas	20
8. Comparativa Crítica con Otras Aproximaciones	20
8.1. Teoría de Cuerdas / Teoría M	20
8.2. Gravedad Cuántica de Búcles (LQG)	20
8.3. Seguridad Asintótica (Asymptotic Safety)	21
8.4. Otras Aproximaciones (Breve Mención)	21
8.5. Resumen Comparativo	21
9. Conclusiones y Perspectivas Futuras	22
9.1. Recapitulación de la Propuesta TUD	22
9.2. Fortalezas y Debilidades Actuales	22
9.3. Líneas de Investigación Futuras	22
9.4. Potencial Impacto en la Física Fundamental	23
9.5. Conclusión General	23
A. Apéndices	24
B. Teorema de Noether No Comutativo	24
B.1. Formulación Variacional con Producto Estrella	24
B.2. Derivación de la Corriente Conservada	24
B.3. Aplicación a Simetrías Espacio-Temporales	24
C. Estabilidad del Vacío en GNC: Análisis Hamiltoniano y Espacios de Krein	24
C.1. Formalismo Hamiltoniano Canónico Adaptado	24
C.2. Identificación del Hamiltoniano Físico y el Problema del Tiempo	25
C.3. Condición de Energía Positiva y Espacios de Krein	25

D. Análisis Detallado del Flujo NPRG para Acoplamientos Clave	25
D.1. Ecuación de Flujo de Wetterich	25
D.2. Truncamiento del Espacio de Teorías	26
D.3. Derivación de Funciones Beta	26
D.4. Búsqueda de Puntos Fijos UV y Seguridad Asintótica	26
D.5. Análisis de Robustez de la Supresión de Jerarquía y Mezcla UV/IR	26
E. Derivación Explícita de las Ecuaciones de Movimiento	26
E.1. Principio de Mínima Acción	26
E.2. Ecuaciones de Einstein Modificadas	27
E.3. Ecuaciones para Campos de Materia (ME^* , Φ , Q)	27
E.4. Ecuación para θ_{NC}^{uv}	27
F. Análisis de la Cancelación Dinámica de la Constante Cosmológica	27
F.1. Sistema de Ecuaciones en Fondo FRW	27
F.2. Búsqueda de Soluciones Atractivas	28
F.3. Análisis de Estabilidad y Sensibilidad	28
G. Ejemplos y Diagramas Ilustrativos	28
G.1. Diagramas Conceptuales	28
G.2. Diagramas de Feynman en GNC	28
G.3. Ejemplo de Cálculo: Amplitud $H \rightarrow \gamma\gamma$ en TUD	29



1. Marco Teórico Fundacional

1.1. Geometría No Conmutativa (GNC) y la Naturaleza Cuántica del Espacio-Tiempo

La GNC extiende la dualidad bien establecida entre espacios geométricos y las álgebras *conmutativas* de funciones definidas sobre ellos (por ejemplo, funciones continuas $C(X)$ sobre un espacio topológico X) al ámbito de las álgebras *no conmutativas*. La idea es que la estructura del espacio puede reconstruirse a partir de su álgebra de funciones; la GNC explora las "geometrías" que corresponden a álgebras donde el orden de la multiplicación importa ($A \cdot B \neq B \cdot A$), como ocurre con los operadores en mecánica cuántica [1]. (Connes NCG book)

1.1.1. Operadores de Coordenadas y Relación de Incertidumbre

La relación de conmutación implica incertidumbres, como se describe en trabajos clave [2–4].

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{1}{2} |\langle [A, B] \rangle| \quad (1)$$

$$\Delta X^\mu \Delta X^\nu \geq \frac{1}{2} |\langle [\hat{X}^\mu, \hat{X}^\nu] \rangle| = \frac{1}{2} |\theta_{NC}^{\mu\nu}| \quad (2)$$

Esto impone un límite fundamental a la precisión con la que se pueden determinar simultáneamente diferentes coordenadas espacio-temporales, sugiriendo una estructura granular o "difusa."^a la escala $l_{NC} = 1/M_{NC}$.

1.1.2. El Tensor de No Conmutatividad $\hat{\Theta}_{NC}^{\mu\nu}$ y su Dinámica

A diferencia de modelos GNC con $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ constante (que rompen explícitamente la invariancia de Lorentz), en la TUD, $\hat{\Theta}_{NC}^{\mu\nu}$ es un campo cuántico dinámico. Su dinámica está regida por un término \mathcal{L}_Θ en la acción total (Sección 1.3) y se acopla a la materia y la geometría.

Observación 1.1 (Restauración de Simetría de Lorentz). Un valor esperado en el vacío $\langle \hat{\Theta}_{NC}^{\mu\nu} \rangle = 0$ es compatible con la invariancia de Lorentz a nivel macroscópico, aunque las fluctuaciones $\langle (\hat{\Theta}_{NC}^{\mu\nu})^2 \rangle \neq 0$ y posibles valores esperados inducidos por el entorno pueden generar efectos *LIV* observables (ver Sección 5). La compatibilidad con los estrictos límites de *LIV* es un desafío clave (ver Sec. 5.3.3).

La dinámica de $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ es esencial para los mecanismos de cancelación dinámica propuestos (Sección 2.2).

1.2. Métrica Efectiva Emergente

En TUD, la métrica gravitacional no es un campo fundamental *a priori*, sino que se postula como una propiedad emergente del álgebra no conmutativa subyacente. Esta idea de **gravedad emergente**, donde la gravedad surge como un fenómeno macroscópico de una teoría cuántica subyacente más fundamental (posiblemente basada en GNC o modelos matriciales), es una línea de investigación activa en gravedad cuántica [5, 6]. (Emergent Gravity/NCG)

1.2.1. Definición Conceptual

La geometría macroscópica percibida por campos de materia a bajas energías ($E \ll M_{NC}$) está codificada en la estructura del álgebra de operadores. Una posible realización (inspirada en [1, 7]) relaciona la métrica efectiva con el anticonmutador de los operadores de coordenadas, incluyendo correcciones dependientes de $\hat{\Theta}_{NC}$:

Definición 1.2 (Métrica Efectiva Emergente (Conceptual)). *La métrica efectiva $g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$ que gobierna la propagación de materia a bajas energías se define conceptualmente como:*

$$g_{\mu\nu}^{\text{eff}} \propto \langle \{ \hat{X}_\mu, \hat{X}_\nu \} \rangle + \Delta g_{\mu\nu}(\theta_{NC}) \quad (3)$$

donde $\{\hat{A}, \hat{B}\} = \hat{A}\hat{B} + \hat{B}\hat{A}$ es el anticomutador simetrizado y $\Delta g_{\mu\nu}(\theta_{NC})$ representa correcciones tensoriales dependientes de $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ y sus derivadas, necesarias para asegurar las propiedades correctas de transformación y el límite clásico adecuado ($g_{\mu\nu}^{\text{eff}} \rightarrow \eta_{\mu\nu}$ o $g_{\mu\nu}^{\text{clásica}}$ cuando $\theta_{NC} \rightarrow 0$). La forma precisa de $\Delta g_{\mu\nu}$ debe derivarse rigurosamente de la estructura completa de la GNC subyacente, lo cual es un área activa de investigación.

1.2.2. Interpretación Física

$g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$ es la métrica que determina los intervalos de espacio-tiempo, la estructura causal macroscópica y la interacción gravitatoria efectiva para partículas con $E \ll M_{NC}$. Es el objeto que conecta la TUD con las observaciones gravitacionales estándar (lentes, ondas gravitacionales, cosmología FRW). Las correcciones $\Delta g_{\mu\nu}(\theta_{NC})$ pueden inducir términos de curvatura de orden superior en la acción gravitacional efectiva o modificar las ecuaciones geodésicas a altas energías o curvaturas.

1.3. La Acción Unificada de la TUD

La dinámica completa de la TUD se deriva de un principio de acción aplicado al espacio-tiempo no conmutativo. Este enfoque puede estar conceptualmente relacionado con el **principio de acción espectral** de Connes, que busca derivar la acción de la física fundamental (incluyendo gravedad y ME) a partir de propiedades espectrales de un operador de Dirac sobre una geometría (posiblemente no conmutativa) [8]. (Spectral Action)

1.3.1. Principio de Acción y Componentes Fundamentales

La acción total S debe ser un escalar bajo las simetrías relevantes (difeomorfismos generalizados, simetrías de gauge). Se construye integrando una densidad Lagrangiana total $\mathcal{L}_{\text{total}}$ definida sobre el espacio-tiempo no conmutativo, donde los productos de campos se reemplazan por el producto estrella de Moyal (\star).

Definición 1.3 (Producto Estrella de Moyal). *El producto estrella de Moyal de dos funciones (o campos clásicos) $f(x)$ y $g(x)$ se define como:*

$$(f \star g)(x) = \exp\left(\frac{i}{2}\theta_{NC}^{\mu\nu}(x)\overleftarrow{\partial}_\mu \overrightarrow{\partial}_\nu\right) f(x)g(x) \quad (4)$$

donde $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ es el valor esperado (campo clásico) del tensor de no conmutatividad. A primer orden en θ_{NC} :

$$(f \star g)(x) = f(x)g(x) + \frac{i}{2}\theta_{NC}^{\mu\nu}(\partial_\mu f)(\partial_\nu g) + \mathcal{O}(\theta_{NC}^2)$$

El producto \star es asociativo pero no conmutativo: $f \star g \neq g \star f$.

La acción total toma la forma conceptual:

$$S = \int d^4x \sqrt{-\det(g_{\mu\nu}^{\text{eff}})} \mathcal{L}_{\text{total}}[g_{\mu\nu}^{\text{eff}}, \Phi_i, \Psi_j, A_\mu^a, \theta_{NC}; \star] \quad (5)$$

donde $\mathcal{L}_{\text{total}}$ se compone de varios sectores:

$$\mathcal{L}_{\text{total}} = \mathcal{L}_{\text{grav}} + \mathcal{L}_{\text{*SM}} + \mathcal{L}_{\text{DM}} + \mathcal{L}_{\text{DE}} + \mathcal{L}_{\text{infl}} + \mathcal{L}_{\Theta} + \Delta\mathcal{L}_{\text{NC}} \quad (6)$$

1.3.2. Sector Gravitacional Modificado ($\mathcal{L}_{\text{grav}}$)

Describe la dinámica de la métrica efectiva $g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$. Se espera que contenga el término de Einstein-Hilbert basado en el escalar de Ricci $R[g_{\mu\nu}^{\text{eff}}]$, pero modificado por correcciones GNC y términos de orden superior inducidos naturalmente:

$$\mathcal{L}_{\text{grav}} = \frac{M_P^2}{2} \left(R[g_{\mu\nu}^{\text{eff}}] - 2\Lambda_{\text{bare}} + \alpha R^2[g_{\mu\nu}^{\text{eff}}] + \beta R_{\mu\nu} R^{\mu\nu}[g_{\mu\nu}^{\text{eff}}] + \dots \right) + \mathcal{L}_{\text{corr}}(\theta_{NC}, g_{\mu\nu}^{\text{eff}}) \quad (7)$$

donde $M_P = (8\pi G)^{-1/2}$ es la masa de Planck reducida, Λ_{bare} es una constante cosmológica "desnuda", y α, β son coeficientes de términos de orden superior. El término R^2 [9] es particularmente relevante para la inflación (Sección 1.3.5) y la renormalizabilidad (Sección 3.2). \mathcal{L}_{corr} representa correcciones explícitas dependientes de θ_{NC} .

1.3.3. Modelo Estándar Extendido (\mathcal{L}_{SM}) y el Producto Estrella

Los campos y las interacciones del ME se definen sobre el espacio-tiempo NC reemplazando el producto puntual ordinario por el producto estrella \star en el Lagrangiano:

$$\mathcal{L}_{\star\text{SM}} = \mathcal{L}_{\text{SM}}[\phi_i, \psi_j, A_\mu^a; g_{\mu\nu}^{\text{eff}}, \star] \quad (8)$$

Esto introduce correcciones dependientes de $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ y de las derivadas (momentos) en todos los vértices y términos cinéticos, generando fenomenología como LIV y mezcla UV/IR [10] (ver Sección 4). Por ejemplo, un término de interacción $g\phi^3$ se convierte en $g\phi \star \phi \star \phi$.

1.3.4. Sectores Oscuros: Materia Oscura (\mathcal{L}_{DM}) y Energía Oscura (\mathcal{L}_{DE})

La TUD incorpora candidatos específicos, cuyas interacciones también se definen con el producto \star .

- **Materia Oscura:** Un campo escalar real Φ con un potencial $V(\Phi)$. Ejemplo:

$$\mathcal{L}_{\text{DM}} = \frac{1}{2}g_{\mu\nu}^{\text{eff}}(\partial_\mu\Phi)(\partial_\nu\Phi) - V(\Phi) + \mathcal{L}_{\text{int}}(\Phi, \text{SM}, \theta_{NC}; \star) \quad (9)$$

Un potencial tipo Higgs $V(\Phi) = \frac{\lambda_\Phi}{4}(\Phi^2 - v_\Phi^2)^2$ podría generar una partícula estable [11]. Las interacciones \mathcal{L}_{int} pueden ocurrir vía portal de Higgs o mediadas por θ_{NC} .

- **Energía Oscura:** Un campo escalar tipo quintaesencia Q con un potencial de evolución lenta $V_Q(Q)$. Ejemplo:

$$\mathcal{L}_{\text{DE}} = \frac{1}{2}g_{\mu\nu}^{\text{eff}}(\partial_\mu Q)(\partial_\nu Q) - V_Q(Q) + \mathcal{L}_{\text{int}}(Q, \dots; \star) \quad (10)$$

Un potencial exponencial $V_Q(Q) = V_0 e^{-\kappa Q/M_P}$ [12] puede generar expansión acelerada.

La elección específica de $V(\Phi)$ y $V_Q(Q)$ define el modelo concreto y debe ser justificada o explorada paramétricamente.

1.3.5. Inflación Primordial en la TUD ($\mathcal{L}_{\text{infl}}$)

La inflación puede ser impulsada por:

- El término R^2 en $\mathcal{L}_{\text{grav}}$ (tipo Starobinsky [9]).
- Uno de los campos escalares (Φ o Q en un régimen temprano).
- Un inflatón dedicado ϕ_{infl} .

En todos los casos, la dinámica inflacionaria y las predicciones para las perturbaciones primordiales (n_s, r, f_{NL}) se ven modificadas por la GNC (vía $g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$ y el producto \star) [13].

1.3.6. Dinámica de $\hat{\Theta}_{NC}^{\mu\nu}$ y Correcciones Explícitas ($\mathcal{L}_\Theta + \Delta\mathcal{L}_{\text{NC}}$)

La acción debe incluir términos cinéticos y un potencial $V(\theta_{NC})$ para el campo dinámico $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ (o los campos fundamentales que lo generan). $\Delta\mathcal{L}_{\text{NC}}$ puede incluir acoplamientos explícitos adicionales entre $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ y otros campos no derivados directamente del reemplazo $\cdot \rightarrow \star$.

Ejemplo 1.4 (Lagrangiano Esquemático para θ_{NC}). Una posible forma para la dinámica de θ_{NC} podría involucrar términos cinéticos construidos a partir de sus derivadas covariantes y un potencial:

$$\mathcal{L}_\Theta = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu\rho\sigma}(\theta_{NC})F^{\mu\nu\rho\sigma}(\theta_{NC}) - V(\theta_{NC}) \quad (\text{Forma esquemática}) \quad (11)$$

donde $F_{\mu\nu\rho\sigma}$ es un tensor de campo apropiado (análogo a $F_{\mu\nu}$ en electromagnetismo) y $V(\theta_{NC})$ es un potencial que debe asegurar un vacío estable (posiblemente $\langle\theta_{NC}\rangle = 0$) y contribuir a la dinámica de cancelación (Sección 2.2). La **forma exacta** de \mathcal{L}_Θ y $V(\theta_{NC})$ es un elemento clave y no especificado que define el modelo concreto de TUD y afecta crucialmente la fenomenología y la consistencia.

2. Mecanismos Dinámicos Clave (Propuestos)

La estructura GNC dinámica de la TUD permite proponer mecanismos intrínsecos para abordar problemas fundamentales. La **robustez y demostración rigurosa** de estos mecanismos es crucial y se discute a continuación como un objetivo de investigación, con detalles técnicos esbozados en los Apéndices D y F.

2.1. Supresión Exponencial de Correcciones Cuánticas y el Problema de la Jerarquía (Hipótesis)

2.1.1. El Mecanismo de Supresión Propuesto

Se *argumenta* que la no commutatividad, particularmente a través de la mezcla UV/IR o la estructura modificada de bucles en teorías de campos no commutativas (NCQFT), *podría* alterar drásticamente las correcciones cuánticas a masas escalares como la del Higgs (m_H). En ciertos modelos GNC, se ha sugerido que las correcciones radiativas δm_H^2 provenientes de una escala de corte UV Λ_{UV} *podrían ser* suprimidas exponencialmente por encima de la escala M_{NC} :

$$\delta m_H^2 \sim \Lambda_{UV}^2 f(\Lambda_{UV}/M_{NC}) \quad \text{donde} \quad f(x) \sim e^{-x^2} \quad \text{para } x \gg 1 \quad (\text{Resultado esperado}) \quad (12)$$

en lugar de la divergencia cuadrática $\delta m_H^2 \sim \Lambda_{UV}^2$ del ME. Esto se debería a la naturaleza no local introducida por el producto \star que efectivamente "suaviza" las interacciones a corta distancia.

2.1.2. Implicaciones para la Masa del Higgs

Si este mecanismo funciona y M_{NC} está significativamente por debajo de M_P (p.ej., en la escala TeV-PeV), las contribuciones de física a escalas $\Lambda_{UV} \gg M_{NC}$ (como GUT o Planck) serían despreciables debido al factor de supresión $f(\Lambda_{UV}/M_{NC})$. Esto *permitiría* que la masa observada $m_H \approx 125$ GeV sea natural sin ajuste fino, vinculando la solución de la jerarquía a la escala de GNC.

2.1.3. Análisis de Robustez del Mecanismo de Supresión (Necesario)

La validez y generalidad de esta supresión exponencial dentro del marco completo y dinámico de la TUD es un punto crítico que **requiere una investigación rigurosa** (ver Apéndice D para el enfoque NPRG propuesto).

- **Dependencia del Modelo:** ¿Cómo afecta la forma exacta de \mathcal{L}_Θ , $V(\theta_{NC})$ y los acoplamientos en $\Delta\mathcal{L}_{NC}$ a la efectividad de la supresión? ¿Es genérica o requiere condiciones específicas?
- **Rango de Validez:** ¿Existen umbrales en M_{NC} o en la intensidad de las interacciones donde el mecanismo deja de ser efectivo? ¿Cómo se ve afectado por la dinámica de θ_{NC} ?
- **Estabilidad y Consistencia:** ¿La dinámica que produce la supresión es estable frente a perturbaciones cuánticas o térmicas? ¿Es consistente con otras restricciones fenomenológicas (ej. LIV)?

- **Comparación Crítica:** ¿Cómo se compara este mecanismo con otros propuestos en GNC o en teorías alternativas (SUSY, dimensiones extra, etc.) en términos de naturalidad y testabilidad?

Se requiere un análisis detallado usando herramientas como el Grupo de Renormalización No Perturbativo (NPRG) para cuantificar la robustez y determinar si la supresión (12) se mantiene en el modelo completo de TUD.

2.2. Cancelación Dinámica de la Constante Cosmológica (Hipótesis)

2.2.1. El Problema de la Constante Cosmológica

La discrepancia de $\sim 60 - 120$ órdenes de magnitud entre la densidad de energía del vacío teórica ($\rho_{\text{vac}}^{\text{th}} \sim M_P^4$ o $\sim M_{\text{SUSY}}^4$, etc.) y la observada ($\rho_{\text{vac}}^{\text{obs}} \sim (10^{-3} \text{ eV})^4$).

2.2.2. El Mecanismo de Cancelación Dinámica Propuesto en la TUD

La TUD *propone* que la energía del vacío (incluyendo Λ_{bare} y las contribuciones de $V(\Phi)$, $V(Q)$, $V(\theta_{NC})$ y condensados cuánticos) se acopla a los campos dinámicos $\theta_{NC}^{\mu\nu}$, Φ , y Q .

Proposición 2.1 (Hipótesis de Cancelación Dinámica). *Se postula que el sistema acoplado de gravedad y los campos escalares/tensoriales ($g_{\mu\nu}^{\text{eff}}, \Phi, Q, \theta_{NC}$) podría poseer soluciones cosmológicas de tipo atractor donde los campos evolucionan dinámicamente hacia valores esperados en el vacío $\langle \Phi \rangle_0, \langle Q \rangle_0, \langle \theta_{NC}^{\mu\nu} \rangle_0$ tales que la contribución efectiva total a la constante cosmológica se relaja a un valor residual muy pequeño, cercano al observado:*

$$\rho_{\text{vac}}^{\text{eff}} = \frac{M_P^2}{2} \Lambda_{\text{bare}} + V(\langle \Phi \rangle_0) + V_Q(\langle Q \rangle_0) + V(\langle \theta_{NC} \rangle_0) + \langle \rho_{\text{quantum}} \rangle \approx \rho_{\text{vac}}^{\text{obs}} \quad (13)$$

La demostración rigurosa de la existencia y propiedades de tales atractores (esbozada en Apéndice F) implica analizar las ecuaciones de movimiento acopladas (derivadas en Apéndice E) y encontrar las condiciones sobre los potenciales y acoplamientos.

2.2.3. Comparación Crítica con Otras Soluciones

A diferencia de la supersimetría (que requiere ruptura y aún así no resuelve completamente el problema), enfoques antrópicos (que invocan un multiverso) o modificaciones de la gravedad ad-hoc, este mecanismo sería, si funciona, una consecuencia intrínseca de la dinámica de los grados de libertad fundamentales de la TUD. Sin embargo, su naturalidad depende crucialmente de la forma de los potenciales y la dinámica del atractor.

2.2.4. Análisis de Robustez del Mecanismo de Cancelación (Necesario)

La viabilidad de este mecanismo depende críticamente de su robustez (ver Apéndice F para detalles).

- **Sensibilidad a Condiciones Iniciales:** ¿El sistema evoluciona hacia el atractor de baja $\rho_{\text{vac}}^{\text{eff}}$ desde un amplio rango de condiciones iniciales en el universo temprano? ¿Es la cuenca de atracción suficientemente grande?
- **Sensibilidad a Parámetros y Ajuste Fino:** ¿La cancelación fina depende críticamente de los valores de los parámetros en los potenciales $V(\Phi)$, $V(Q)$, $V(\theta_{NC})$? ¿Introduce un nuevo problema de ajuste fino?
- **Correcciones Cuánticas/Térmicas:** ¿El mecanismo de cancelación sobrevive a las correcciones cuánticas (loop) o a los efectos térmicos en el universo temprano? ¿Cómo afectan las transiciones de fase?
- **Estabilidad del Atractor:** ¿Es el estado final de baja energía del vacío estable a largo plazo frente a perturbaciones?

Un análisis detallado de estabilidad y sensibilidad de las soluciones atractivas es fundamental para evaluar la viabilidad de esta propuesta.

3. Consistencia Matemática y Estabilidad

La viabilidad de la TUD depende de su consistencia matemática interna y estabilidad física. Los detalles técnicos, que requieren un desarrollo completo, se esbozan en los Apéndices B, C y D.

3.1. Análisis Hamiltoniano y Condición de Energía Positiva

3.1.1. Formalismo Hamiltoniano en GNC

Se requiere adaptar el formalismo Hamiltoniano canónico (paréntesis de Poisson/Moyal, análisis de restricciones de Dirac) al contexto no conmutativo para identificar los grados de libertad físicos, verificar la consistencia de las ecuaciones de movimiento y establecer las bases para la cuantización. Este formalismo se desarrolla conceptualmente en el Apéndice C. Este análisis es crucial para abordar el **problema del tiempo** dentro de TUD, ya que el Hamiltoniano en RG se convierte en una restricción (ecuación de Wheeler-DeWitt), llevando al "formalismo congelado". La TUD debe mostrar cómo emerge una noción de tiempo efectiva o si propone una solución diferente (quizás relacionada con la dinámica de θ_{NC}).

3.1.2. Estabilidad y Ausencia de Modos Fantasma

La presencia de derivadas superiores (ej., en R^2 o \mathcal{L}_Θ) o métricas internas indefinidas (potencialmente en el espacio de campos θ_{NC}) podría introducir modos fantasma (estados con norma negativa o energía negativa) que violan la unitariedad y la estabilidad del vacío.

Teorema 3.1 (Condición de Estabilidad - Objetivo). *Para que la TUD sea físicamente viable, se debe demostrar que el Hamiltoniano físico $\hat{\mathcal{H}}_{\text{phys}}$, actuando sobre el subespacio de Hilbert de estados físicos $\mathcal{H}_{\text{phys}}$ (obtenido tras resolver las restricciones), es positivo definido: $\langle \psi | \hat{\mathcal{H}}_{\text{phys}} | \psi \rangle \geq 0$ para todo $|\psi\rangle \in \mathcal{H}_{\text{phys}}$.*

Esto asegura la estabilidad del vacío y la unitariedad de la evolución temporal. El análisis (ver Apéndice C) puede requerir el uso de formalismos como el de espacios de Krein si aparecen métricas indefinidas, demostrando que los fantasmas se desacoplan o no pertenecen al espectro físico. La forma de $V(\theta_{NC})$ y \mathcal{L}_Θ es crucial aquí.

3.2. Comportamiento Asintótico y Renormalización

3.2.1. Renormalizabilidad y Seguridad Asintótica

La inclusión de términos como R^2 en $\mathcal{L}_{\text{grav}}$ [9] mejora el comportamiento UV de la gravedad perturbativa. La GNC actúa como un regulador UV, pero introduce la mezcla UV/IR [10]. Una pregunta fundamental es si la TUD es renormalizable o, idealmente, asintóticamente segura.

Definición 3.2 (Seguridad Asintótica [14]). *Una teoría es asintóticamente segura si su flujo bajo el Grupo de Renormalización (RG) converge a un punto fijo no gaussiano (interactuante) en el límite ultravioleta (UV), con un número finito de direcciones relevantes (parámetros libres).*

Si la TUD es asintóticamente segura, sería una teoría fundamental predictiva.

3.2.2. Análisis mediante el Grupo de Renormalización No Perturbativo (NPRG)

El NPRG (o FRG, Functional Renormalization Group) es una herramienta poderosa para estudiar el flujo de la acción efectiva Γ_k desde el UV ($k \rightarrow \infty$) al IR ($k \rightarrow 0$). Aplicado a la TUD (ver Apéndice D), permite investigar:

- La existencia de puntos fijos UV (gaussianos o no gaussianos) que controlarían el comportamiento a altas energías.
- El flujo de los acoplamientos relevantes (constante de Newton G_k , constante cosmológica Λ_k , coeficientes α_k, β_k de R^2 , etc., y los parámetros del sector θ_{NC}).
- La consistencia cuántica y la predictividad de la teoría.
- Verificar si la supresión de la jerarquía (Sección 2.1) se realiza dinámicamente en el flujo RG.

El Apéndice D detalla el formalismo y los objetivos del análisis NPRG para la TUD.

3.3. Simetrías y Leyes de Conservación: Teorema de Noether No Commutativo

Las simetrías continuas de la acción S (5), definida con el producto \star , conducen a leyes de conservación modificadas.

Teorema 3.3 (Teorema de Noether No Commutativo - Esbozo). *A cada transformación de simetría continua de la acción S corresponde una corriente \mathcal{J}_\star^μ que satisface una ley de conservación modificada por el producto estrella:*

$$\partial_\mu \mathcal{J}_\star^\mu = \mathcal{T}_\star \quad (14)$$

donde \mathcal{J}_\star^μ es la corriente de Noether modificada (involucra productos \star) y \mathcal{T}_\star es un término que puede ser no nulo si la simetría no es exacta o si θ_{NC} no es constante (ej. para traslaciones si $\partial_\mu \theta_{NC} \neq 0$).

La derivación detallada (Apéndice B) confirma la conservación (modificada) de cantidades fundamentales como el tensor energía-momento y el momento angular, asegurando la consistencia con principios físicos básicos.

4. Interconexión con el Modelo Estándar (ME)

La TUD incorpora el ME modificándolo a través de la GNC y el producto estrella \star .

4.1. Modificaciones a las Interacciones del ME

4.1.1. El Producto Estrella (\star) y su Impacto en Vértices y Propagadores

El reemplazo $\cdot \rightarrow \star$ en $\mathcal{L}_{\star SM}$ introduce correcciones dependientes de $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ y de los momentos (p, k) de las partículas interactuantes en todos los vértices y términos cinéticos.

- **Vértices:** Un vértice $g\phi_1\phi_2\phi_3$ se convierte en $g\phi_1 \star \phi_2 \star \phi_3$. En el espacio de momentos, esto introduce factores de fase oscilatorios en las amplitudes de Feynman, del tipo $e^{ip \wedge k / M_{NC}^2}$, donde $p \wedge k = \frac{1}{2}\theta_{NC}^{\mu\nu} p_\mu k_\nu$. Estos factores modifican secciones eficaces, tasas de desintegración y pueden inducir LIV.
- **Propagadores:** Los términos cinéticos también se modifican (ej. $\bar{\psi} \star i\gamma^\mu D_\mu \star \psi$), lo que puede alterar los propagadores, especialmente a altas energías.

Estas modificaciones son genéricas y afectan a *todas* las interacciones del ME.

4.1.2. Ejemplo: Vértice $H \rightarrow \gamma\gamma$

La desintegración $H \rightarrow \gamma\gamma$, mediada por bucles (principalmente W y t), se ve afectada por la modificación \star de los vértices internos (ej., HWW , $H\bar{t}t$) y los acoplamientos de gauge. La amplitud resultante $A_\star(H \rightarrow \gamma\gamma)$ adquiere una dependencia de $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ y de los momentos de los fotones k_1, k_2 :

$$A_\star(H \rightarrow \gamma\gamma) = A_{SM}(H \rightarrow \gamma\gamma) \times (1 + f(\theta_{NC}, k_1, k_2, m_{loop}) + \mathcal{O}(\theta_{NC}^2)) \quad (15)$$

Esto altera la tasa total y potencialmente la distribución angular, ofreciendo una posible vía de testeo [?]. La forma exacta de f requiere un cálculo de bucle en NCQFT (ver Apéndice G).

4.1.3. Otras Modificaciones y Dependencias Fenomenológicas

- **Acoplamientos de Yukawa:** $y_f H \star \bar{\psi} \star \psi$ afecta masas y desintegraciones.
- **Autointeracciones de Gauge:** $\text{Tr}(F_{\mu\nu} \star F^{\mu\nu})$ modifica vértices de 3 y 4 bosones.
- **Dependencia Energética:** Las desviaciones en secciones eficaces (σ) típicamente escalan con la energía (E) como $\Delta\sigma/\sigma \sim (E/M_{NC})^2$ o potencias superiores, siendo más relevantes a altas energías (colisionadores).
- **Violación de Invariancia de Lorentz (LIV):** La presencia de $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ introduce una estructura de fondo preferente (aunque dinámica), que puede manifestarse como LIV en umbrales de reacción, dispersión de partículas, oscilaciones de neutrinos, etc. [15].

4.2. Renormalización en Teorías de Campos No Conmutativas (NCQFT)

4.2.1. Regularización y Mezcla UV/IR

La GNC actúa como regulador UV (debido a M_{NC}), pero introduce el fenómeno de **mezcla UV/IR** [10]: las divergencias UV de diagramas planares pueden reaparecer como divergencias IR (en el límite de momento $p \rightarrow 0$) en diagramas no planares, incluso en teorías masivas. Esto es una consecuencia de los factores de fase $e^{ip^\wedge k}$ en los vértices y representa un desafío significativo para la renormalización de NCQFTs.

Observación 4.1 (Impacto de θ_{NC} Dinámico). La naturaleza dinámica de $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ en la TUD *podría* alterar o mitigar este comportamiento problemático de la mezcla UV/IR, lo cual está intrínsecamente relacionado con el mecanismo propuesto de supresión de la jerarquía (Sección 2.1) y debe ser investigado rigurosamente mediante NRG (Apéndice D).

Se ha logrado progreso en la renormalización de ciertos modelos NCQFT, como el **modelo de Gross-Wulkenhaar**, que introduce un término de oscilador armónico para controlar la mezcla UV/IR en teorías escalares [16]. Otros enfoques incluyen modificaciones del esquema BPHZ, renormalización algebraica y modelos invariantes por traslación [17]. La renormalización de teorías de gauge NC sigue siendo un área de investigación activa.

4.2.2. Diagramas de Feynman en GNC

Los cálculos perturbativos usan diagramas de Feynman con reglas modificadas (ver Apéndice G para ejemplos):

- Vértices con factores de fase dependientes de $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ y momentos.
- Propagadores posiblemente modificados por $g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$ o \mathcal{L}_Θ .
- Distinción entre diagramas planares y no planares, con diferentes comportamientos UV/IR.

5. Predicciones Observacionales y Contrastación Experimental

La viabilidad de la TUD depende de su capacidad para hacer predicciones contrastables y acomodar las restricciones existentes.

5.1. Huellas en Cosmología

5.1.1. Fondo Cósmico de Microondas (CMB)

- **Espectros de Potencia:** Modificaciones en el índice espectral escalar n_s y el cociente tensor-escalar r debido a la dinámica inflacionaria GNC [9, 13]. Predicción cuantitativa: $\Delta n_s \sim f_s(M_{NC}, \text{params}_{infl})$, $\Delta r \sim f_r(M_{NC}, \text{params}_{infl})$.

- **No Gaussianidades Primordiales:** Generación de no gaussianidades (f_{NL}) con formas específicas (potencialmente local, equilátero o folded, dependiendo del mecanismo inflacionario exacto en TUD y las interacciones \star) [18]. Predicción cuantitativa: $f_{NL}^{\text{tipo}} \sim g(M_{NC}, \text{params}_{infl})$.
- **Anisotropías Estadísticas:** Posibles anisotropías estadísticas inducidas por un valor esperado $\langle \theta_{NC}^{\mu\nu} \rangle \neq 0$ durante la inflación o recombinación.

5.1.2. Estructura a Gran Escala (LSS)

- **Espectro de Potencia de Materia:** Modificaciones en $P(k)$ y la tasa de crecimiento de estructuras $f\sigma_8$ debido a la gravedad modificada ($g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$) y la dinámica de los campos oscuros Φ, Q [19]
- **Anisotropías Estadísticas:** Posibles anisotropías en la distribución de galaxias correlacionadas con $\langle \theta_{NC}^{\mu\nu} \rangle$.

5.1.3. Ondas Gravitacionales Primordiales (GW)

Predicción de un fondo estocástico de GW con un espectro $\Omega_{GW}(f)$ modificado por la GNC en el universo temprano, potencialmente detectable [20]. La forma del espectro dependería de M_{NC} y la historia de expansión.

5.2. Señales en Física de Partículas

5.2.1. Colisionadores de Alta Energía (LHC y Futuros)

- **Producción de Nuevas Partículas:** Búsqueda de resonancias correspondientes a excitaciones de Φ , Q , o del sector Θ .
- **Desviaciones en Procesos SM:** Búsqueda de desviaciones en secciones eficaces y distribuciones angulares respecto a las predicciones del ME, creciendo típicamente con la energía:

$$\frac{\sigma_{\text{TUD}} - \sigma_{\text{SM}}}{\sigma_{\text{SM}}} \approx c \left(\frac{E}{M_{NC}} \right)^2 + \mathcal{O} \left(\left(\frac{E}{M_{NC}} \right)^4 \right) \quad (16)$$

donde el coeficiente c depende del proceso específico y los parámetros de θ_{NC} .

- **Efectos LIV:** Búsqueda de dependencias de la sección eficaz o de los productos de desintegración con la dirección del haz o el boost del sistema.

5.2.2. Física de Neutrinos

Modificaciones en las oscilaciones de neutrinos debido a términos *LIV* dependientes de $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ en el Hamiltoniano efectivo, o interacciones no estándar (NSI) inducidas por \star [21]. (Volumen 1 del Informe de Diseño Técnico (TDR) de DUNE.) Búsqueda de anomalías en espectros o direcciones de llegada.

5.2.3. Búsqueda de Materia Oscura (Φ)

- **Detección Directa:** Dispersión Φ -núcleo, con sección eficaz $\sigma_{\Phi N}$ dependiente del acoplamiento Φ -SM (mediado por Higgs o θ_{NC}).
- **Detección Indirecta:** Señales de aniquilación/desintegración de Φ (rayos gamma, antimateria) desde regiones densas (centro galáctico, galaxias enanas).
- **Colisionadores:** Producción de Φ asociada a energía faltante.

La TUD proporciona un candidato específico Φ cuyas propiedades (masa, acoplamientos) deben ser consistentes con los límites existentes [11].

5.3. Astrofísica y Fenómenos de Alta Energía

5.3.1. Rayos Gamma y Cósmicos de Ultra Alta Energía (UHECR)

- **Retardos Temporales (*LIV*):** Búsqueda de retardos temporales dependientes de la energía $\Delta t \propto (E/M_{NC})^n L$ (con $n = 1$ o $n = 2$ típicamente) para fotones/neutrinos de fuentes astrofísicas distantes (GRBs, AGNs) [15]. Los límites actuales son muy restrictivos (ver Sec. 5.3.3).
- **Umbrales de Reacción Modificados:** Alteración de umbrales para procesos como $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ o $p\gamma \rightarrow p\pi^0$, afectando los espectros observados.

5.3.2. Ondas Gravitacionales Astrofísicas

Posibles modificaciones en la propagación de GW (dispersión dependiente de la frecuencia, birrefringencia, polarizaciones anómalas) debido a $g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$ o θ_{NC} , potencialmente detectables en eventos multi-mensajero.

5.3.3. Resumen de Pruebas de Violación de la Simetría de Lorentz (*LIV*)

La TUD predice *LIV* parametrizada por $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ y M_{NC} . Las pruebas abarcan astrofísica (retardos, umbrales), neutrinos (oscilaciones), colisionadores (dependencia direccional), espectroscopía atómica, etc. Los límites actuales son **muy restrictivos** y deben ser acomodados por la teoría. Por ejemplo, observaciones de GRBs han establecido límites muy fuertes. Observaciones del GRB 221009A por LHAASO imponen límites a la escala de energía *LIV* $E_{QG,n}$ (donde $n = 1$ para dependencia lineal, $n = 2$ para cuadrática) del orden de varias veces la energía de Planck ($E_{Pl} \sim 1,22 \times 10^{19}$ GeV) para $n = 1$, y aún más fuertes para $n = 2$ [22]. Observaciones anteriores de Fermi-LAT sobre GRB090510 también proporcionan límites robustos [23]. Otros experimentos como HAWC y H.E.S.S. contribuyen mediante el estudio de umbrales de producción de pares o la posible desintegración de fotones [24]. La TUD debe demostrar cómo su mecanismo (posiblemente la naturaleza dinámica de θ_{NC} haciendo $\langle \theta_{NC} \rangle \approx 0$ hoy, o una estructura específica de operadores *LIV* suprimidos) es compatible con estos límites tan estrictos. **Demostrar esta compatibilidad es crucial.**

Cuadro 1: Ejemplos de Límites Experimentales sobre *LIV* (Fotones, 95 % CL). $E_{Pl} \approx 1,22 \times 10^{19}$ GeV.

Experimento/Obs.	Fuente Astro.	Parámetro <i>LIV</i>	Límite Inferior $E_{QG,n}$ / Límite Superior $ \delta_0 $	Técnica
LHAASO [22]	GRB 221009A	$E_{QG,1}^{(-)}$ (subluminal)	$> 8,2 E_{Pl}$	Time-of-Flight
LHAASO [22]	GRB 221009A	$E_{QG,1}^{(+)}$ (superluminal)	$> 9,0 E_{Pl}$	Time-of-Flight
LHAASO [22]	GRB 221009A	$E_{QG,2}^{(\pm)}$ (cuadrático)	$> 5,7 \times 10^{-8} E_{Pl}$	Time-of-Flight
Fermi-LAT [23]	GRB090510	$E_{QG,1}^{(-)}$	$> 1,3 E_{Pl}$ (estimado)	Time-of-Flight
Fermi-LAT [23]	GRB090510	$E_{QG,1}^{(+)}$	$> 1,0 E_{Pl}$ (estimado)	Time-of-Flight
H.E.S.S./FACT [?]	Mrk 501	$E_{QG,2}^{(-)}$	$> 2,6 \times 10^{10}$ GeV	Prod. Pares
HAWC [24]	Fuentes Galácticas	$E_{QG,2}^{(+)}$	$> 2 \times 10^{14}$ GeV	Desint. Fotón

Nota: Los límites pueden variar según el modelo y análisis específicos. $E_{QG,n}$ es la escala de energía *LIV* para dependencia $\propto (E/E_{QG,n})^n$. Las referencias son indicativas y deben ser verificadas/completadas.

5.3.4. Agujeros Negros Supermasivos y Acreción en TUD (Especulativo)

La formación y crecimiento de agujeros negros supermasivos (SMBH) en los centros galácticos, especialmente en épocas tempranas, presenta desafíos para los modelos estándar. La TUD *podría* ofrecer nuevas perspectivas, aunque de forma **altamente especulativa** en esta etapa. Los efectos de la GNC, al introducir una escala de longitud mínima $\sim 1/M_{NC}$, podrían regular la singularidad central clásica de la RG, modificando la estructura interna del agujero negro y potencialmente afectando su evolución a largo plazo o la información perdida. Además, la métrica efectiva $g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$ podría desviarse significativamente de la de Kerr cerca del horizonte en regímenes de alta curvatura. La dinámica del tensor θ_{NC} en el entorno extremo de un disco de acreción podría interactuar con los campos electromagnéticos (vía términos \star en el Lagrangiano de Maxwell modificado), potencialmente influyendo en la eficiencia de la acreción, la extracción de energía rotacional (análogo al mecanismo Blandford-Znajek) o la estabilidad del disco. Estos efectos **requerirían soluciones explícitas** de las ecuaciones de TUD en gravedad fuerte, lo cual es computacionalmente muy exigente y **necesita un desarrollo teórico considerable**.

5.3.5. Formación de Galaxias Masivas Tempranas en TUD (Especulativo)

Observaciones recientes (ej., JWST) han revelado galaxias aparentemente más masivas y evolucionadas en el universo temprano ($z > 10$) de lo esperado en el modelo Λ CDM estándar. La TUD *podría*, hipotéticamente, influir en la formación temprana de estructuras de varias maneras. Primero, las propiedades específicas del candidato a materia oscura Φ (masa, autointeracciones, interacciones con bariones mediadas por \star o θ_{NC}) podrían alterar la formación y el perfil de los halos de materia oscura temprana. Segundo, si la energía oscura Q tuvo una dinámica no trivial en épocas tempranas (diferente de una constante cosmológica), podría haber afectado la tasa de expansión y , por tanto, el tiempo disponible para el crecimiento de estructuras. Tercero, las modificaciones a la gravedad ($g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$ y términos R^2) podrían alterar la tasa de colapso gravitatorio. Finalmente, la fase inflacionaria en TUD (Sec. 1.3.5) podría generar un espectro de potencias primordial o no gaussianidades específicas que favorezcan la formación temprana de objetos masivos. Investigar cuantitativamente estas posibilidades **requiere simulaciones cosmológicas detalladas** que incorporen la dinámica completa de TUD ($g_{\mu\nu}^{\text{eff}}, \Phi, Q, \theta_{NC}$) y las interacciones \star , lo cual representa un **desafío computacional y de modelado significativo**.

5.3.6. Jets Relativistas en TUD (Especulativo)

Los mecanismos de lanzamiento y colimación de los potentes jets relativistas observados en AGN y cuásares involucran procesos magnetohidrodinámicos complejos cerca del SMBH central y su disco de acreción. La TUD *podría* introducir modificaciones **especulativas** en este escenario. La interacción del tensor dinámico θ_{NC} con los intensos campos magnéticos (B) cerca del agujero negro, a través de términos modificados por \star en la electrodinámica (ej., $\sim \theta_{NC} F \wedge F$ o acoplamientos directos $\theta_{NC} \cdot B$), podría influir en la extracción de energía (vía mecanismos tipo Penrose o Blandford-Znajek modificados) o en la propia estructura del campo magnético responsable de la colimación. Adicionalmente, la física de partículas modificada por el producto \star dentro del plasma del jet (a energías potencialmente altas cerca de la base) podría alterar procesos de aceleración de partículas o la producción de radiación observada (sincrotrón, Compton inverso). Evaluar estas ideas **requiere un modelado MHD relativista** en el marco de la GNC dinámica y la electrodinámica \star -modificada, una tarea teórica y computacionalmente **muy avanzada y actualmente no desarrollada**.

5.4. Análisis Estadístico y Ajuste de Parámetros

5.4.1. Metodologías

Se requiere el uso de técnicas estadísticas avanzadas (ej., MCMC, análisis bayesianos) para ajustar los parámetros libres de la TUD (M_{NC} , componentes de θ_{NC} , parámetros de $V(\Phi), V(Q), V(\theta_{NC})$, α, β , etc.) utilizando datos combinados de CMB, LSS, SNe Ia, BBN, LHC, *LIV*, detección de DM, etc.

5.4.2. Constricciones Actuales y Escenarios “Benchmark”

Los límites *LIV* astrofísicos suelen empujar M_{NC} hacia M_P para ciertos operadores, mientras que LHC impone $M_{NC} \gtrsim \mathcal{O}(1)$ TeV para efectos directos. La TUD debe acomodar estos límites, posiblemente vía la dinámica de θ_{NC} (ej., $\langle \theta_{NC} \rangle \approx 0$ hoy) o situando M_{NC} en un rango específico. Es crucial definir escenarios “benchmark” (puntos específicos en el espacio de parámetros) y calcular todas sus predicciones simultáneamente para una contrastación efectiva.

5.4.3. Tabla Resumen de Parámetros y Sensibilidad (Conceptual)

Parámetro TUD	Sondas Observacionales Principales	Límite/Sensibilidad Actual (Orden Mag.)
M_{NC}	<i>LIV</i> (astro, colisionadores), $\Delta\sigma_{SM}$ (LHC)	\gtrsim TeV (directo), $\gg E_{Pl}$ (indirecto, <i>LIV</i> - ¡Muy restrictivo!)
$\theta_{NC}^{\mu\nu}$ (amplitud) $m_\Phi, \lambda_\Phi, v_\Phi$	<i>LIV</i> , Anisotropías CMB/LSS DM (directa, indirecta, reliquia)	Muy restrictivo si $\langle \theta_{NC} \rangle \neq 0$ Dependiente del modelo
V_0, κ (para Q) α, β (en \mathcal{L}_{grav}) Paráms. $V(\theta_{NC})$	Cosmología (SNIa, H0, LSS) Inflación (CMB: n_s, r) Dinámica CC, Estabilidad, Dinámica θ_{NC}	Ajustable a datos DE Consistente con R^2 Teórico / Indirecto / No especificado

Nota: Esta tabla es conceptual y muy simplificada. Los límites reales dependen fuertemente del modelo específico, los acoplamientos y los operadores *LIV* considerados.

6. Análisis Detallado de Observaciones Clave

Nota Importante: Esta sección requiere una **actualización continua y rigurosa** con los últimos resultados experimentales y análisis fenomenológicos para mantener su validez. La discusión siguiente refleja un estado hipotético y debe ser revisada periódicamente.

Se discute brevemente la conexión (potencial o problemática) entre la TUD y áreas observacionales clave:

- Modos B Primordiales (CMB):** Sensibles a la inflación (r). TUD predice r modificado por GNC [13]. (Estado: Límites superiores $r \lesssim 0,03$).
- No Gaussianidades Primordiales (CMB) [18]:** Límites estrictos ($f_{NL}^{local} \approx 0 \pm 5$). TUD predice formas específicas; requiere f_{NL} pequeño. (Estado: Consistente con gaussianidad).
- Pruebas de *LIV* Astrofísico [15]:** Límites muy fuertes sobre M_{NC} ($\gg M_P$ para algunos operadores) desde GRBs, AGNs (ver Sec. 5.3.3). TUD debe acomodarlos ($\langle \theta_{NC} \rangle \approx 0$? ¿Supresión dinámica?). (Estado: Tensión potencial significativa).
- Búsqueda de Materia Oscura (WIMPs, Axiones, etc.):** Límites estrictos de detección directa/indirecta. TUD ofrece Φ , cuyas propiedades deben ajustarse a los límites [11]. (Estado: Sin detección confirmada).
- Tensión en la Constante de Hubble (H_0) [?]:** Discrepancia $\sim 5\sigma$ entre medidas locales y CMB. ¿Resoluble con dinámica de Q en TUD? (Estado: Tensión significativa, posible ventana para nueva física).
- Momento Dipolar Anómalo del Muón ($g-2$):** Desviación $\sim 5\sigma$ del ME. ¿Explicable por correcciones de bucle GNC (\star) en TUD [25–28] (Estado: Desviación significativa, posible ventana).

7. **Búsquedas de *LIV* en Colisionadores (LHC):** Límites $M_{NC} \gtrsim \text{TeV}$. (Estado: Sin evidencia de *LIV*).
8. **Estabilidad del Vacío Electrodébil:** Vacío metaestable en ME. ¿Modificada por GNC o sector Φ ? (Estado: Teórico, requiere análisis).
9. **Otras Anomalías (menos significativas):** Exceso de positrones [?], anomalías en $B \rightarrow K^{(*)}\ell\ell$, etc. ¿Podría TUD explicarlas? (Estado: Variable, a menudo debatido).
10. **Consistencia con Pruebas de Precisión EW:** Las modificaciones \star deben ser compatibles con los datos de precisión electrodébil.

La evaluación global de la viabilidad de la TUD requiere un ajuste combinado a todos estos datos.

7. Simulaciones Numéricas y Herramientas Computacionales

7.1. Necesidad de Simulaciones en GNC

La complejidad de las ecuaciones de movimiento acopladas (Apéndice E), la naturaleza no lineal de la gravedad y las interacciones \star , la necesidad de análisis estadísticos globales y el estudio de regímenes no perturbativos hacen indispensables las simulaciones numéricas para:

- **Cosmología:** Evolución del universo temprano (inflación, recalentamiento), cálculo preciso de observables CMB y LSS, formación de estructuras en presencia de $g_{\mu\nu}^{\text{eff}}, \Phi, Q, \theta_{NC}$.
- **Física de Partículas:** Cálculos de secciones eficaces y tasas de desintegración incluyendo efectos \star y bucles, desarrollo de generadores de eventos Monte Carlo para búsquedas en colisionadores.
- **Gravedad Fuerte:** Estudio de agujeros negros y estrellas de neutrones en GNC.
- **Estudios No Perturbativos:** Resolución numérica de ecuaciones de flujo NRG (Apéndice D), simulaciones en Lattice GNC.
- **Análisis de Robustez:** Exploración del espacio de parámetros y condiciones iniciales para los mecanismos dinámicos (Sección 2).

7.2. Métodos Numéricos Adaptados y Desafíos

Se requieren métodos adaptados y el desarrollo de nuevas herramientas:

- **Teoría de Campos en Red No Conmutativa (Lattice GNC):** Discretización del espacio-tiempo NC para estudios no perturbativos. Desafíos: Definición de derivadas y producto \star en el retículo, preservación de simetrías, problemas de signo. Estrategias: Uso de formulaciones exactas en red (si existen), métodos de reponderado, simulaciones en volumen finito.
- **Resolución Numérica de EDOs/EDPs Acopladas:** Para ecuaciones de evolución cosmológica (modificaciones de CAMB/CLASS) y ecuaciones de flujo NRG (solucionadores específicos). Desafíos: Rigididad (stiffness) del sistema, alta dimensionalidad del espacio de teorías. Estrategias: Métodos implícitos, técnicas de reducción de orden, algoritmos adaptativos.
- **Métodos Monte Carlo:** Para Lattice GNC, generadores de eventos (modificaciones de MadGraph/Pythia) y análisis MCMC bayesianos. Desafíos: Eficiencia de muestreo en espacios de parámetros grandes, cálculo de amplitudes con fases \star . Estrategias: Algoritmos HMC (Hybrid Monte Carlo), MCMC anidado (Nested Sampling), desarrollo de generadores de eventos específicos para NCQFT.

7.3. Software y Plataformas Requeridas

Se necesita una combinación de:

- Computación de alto rendimiento (HPC) para simulaciones a gran escala.
- Software de cálculo simbólico (Mathematica, Maple, SymPy) para derivaciones analíticas y generación de código.
- Códigos numéricos específicos (nuevos o adaptados de códigos existentes como Einstein Toolkit, Gadget, etc.).
- Herramientas de análisis de datos y visualización (Python con SciPy/NumPy/Astropy/Matplotlib, R, ROOT).

El desarrollo y validación de estas herramientas computacionales es un paso crucial y laborioso para la exploración fenomenológica de la TUD.

8. Comparativa Crítica con Otras Aproximaciones

Es fundamental situar la TUD en el contexto de otros enfoques hacia la gravedad cuántica y la unificación, analizando críticamente sus diferencias, ventajas y desventajas relativas.

8.1. Teoría de Cuerdas / Teoría M

- **Principios:** Objetos extendidos (cuerdas/branas), dimensiones extra, supersimetría (SUSY).
- **Comparación Crítica:**
 - *Entidades Fundamentales:* Cuerdas/Branas vs. Campos cuánticos en GNC.
 - *Espacio-Tiempo:* Dimensiones extra (compactificadas) vs. GNC dinámica 4D.
 - *Gravedad/Unificación:* Gravedad emerge de modos de cuerda cerrada; unificación vía espectro de cuerdas vs. Unificación vía acción única en GNC ($g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$, ME^\star , Φ, Q, θ_{NC}).
 - *Simetrías:* SUSY (predicha, no observada) vs. *LIV* (predicha, fuertemente restringida). TUD evita la necesidad de SUSY para la jerarquía, pero introduce *LIV* que debe ser suprimido o pequeño.
 - *Problemas Resueltos:* Potencialmente resuelve jerarquía (SUSY, aunque tensionada) y CC (paisaje/antrópico, conceptualmente insatisfactorio para algunos) vs. Mecanismos dinámicos propuestos en TUD (robustez por demostrar, potencial mayor naturalidad si funcionan).
 - *Testabilidad:* Búsqueda de SUSY, dimensiones extra, paisaje (difícil) vs. Búsqueda de *LIV*, desviaciones \star , nuevas partículas (Φ, Q, Θ). Ambas enfrentan desafíos significativos, pero las predicciones *LIV*/ \star de TUD podrían ser más directas si M_{NC} no es excesivamente alta.

8.2. Gravedad Cuántica de Bucles (LQG)

- **Principios:** Cuantización canónica no perturbativa de GR, independencia de fondo, discretización espacial (redes de espín, espectro de área/volumen).
- **Comparación Crítica:**
 - *Enfoque:* Cuantización directa de GR vs. Modificación fundamental del espacio-tiempo (GNC) como punto de partida.
 - *Espacio-Tiempo:* Discreto (espacial) y emergente vs. Continuo non conmutativo fundamental (aunque con escala mínima).

- *Materia:* Acoplamiento a posteriori (aún un desafío significativo) vs. Integración conceptual desde el principio en el marco GNC ($ME\star, \Phi, Q$).
- *Simetrías:* Invariancia de Lorentz es un desafío (puede romperse o ser emergente en el límite semicásico) vs. LIV como predicción natural (aunque restringida).
- *Predicciones:* Fenomenología de espuma cuántica, cosmología de bucles (LQC) vs. Fenomenología GNC (LIV, \star , etc.). Ambas con dificultades para conectar con régimen experimental actual.

8.3. Seguridad Asintótica (Asymptotic Safety)

- **Principios:** Existencia de un punto fijo UV no gaussiano en el flujo RG de la gravedad acoplada a la materia, asegurando consistencia QFT.
- **Comparación Crítica:**
 - *Metodología:* Basada en el formalismo QFT y RG (requiere truncamientos) vs. Basada en modificación geométrica fundamental (GNC) (requiere definir modelo GNC específico).
 - *Herramientas Comunes:* El NRG es una herramienta clave en ambos enfoques (ver Apéndice D). TUD podría ser asintóticamente segura si se encuentra un punto fijo UV adecuado en su flujo RG. Son enfoques potencialmente compatibles o complementarios.
 - *Espacio-Tiempo:* Generalmente asume espacio-tiempo continuo clásico en la formulación inicial del flujo vs. GNC fundamental (podría ser la microestructura subyacente al punto fijo).
 - *Predicciones:* Valores para acoplamientos en el punto fijo (potencialmente predictivos para masas, etc.) vs. Predicciones ligadas a la escala M_{NC} y la estructura de θ_{NC} .

8.4. Otras Aproximaciones (Breve Mención)

- **Triangulaciones Dinámicas Causales (CDT):** Enfoque Lattice non perturbativo, independencia de fondo. Geometría emergente, resultados interesantes en 2+1D y 3+1D.
- **Geometría Espectral (Connes):** Conexión conceptual fuerte con GNC, intenta derivar el ME de principios geométricos [1]. Utiliza el principio de acción espectral. Requiere elecciones específicas de álgebra y espectro.
- **Modelos Matriciales:** Teorías cuánticas de matrices (a menudo en 0 dimensiones) propuestas como definiciones no perturbativas de Teoría de Cuerdas/M o como modelos donde el espacio-tiempo y la gravedad emergen de la dinámica matricial [29, 30]. Algunos modelos matriciales están relacionados con teorías de gauge en espacios no conmutativos.

8.5. Resumen Comparativo

La TUD ofrece una perspectiva distinta basada en la GNC dinámica, integrando gravedad, ME y sectores oscuros desde el principio. Su principal desafío radica en demostrar la robustez de sus mecanismos dinámicos, especificar completamente el modelo (\mathcal{L}_Θ , potenciales), y encontrar evidencia experimental de sus predicciones únicas (LIV , efectos \star), especialmente reconciliando la predicción de LIV con las fuertes restricciones existentes. Cada enfoque tiene sus fortalezas y debilidades, y la validación experimental será el árbitro final. La posible conexión o compatibilidad entre enfoques (ej. TUD y Seguridad Asintótica, o TUD y aspectos de modelos matriciales/acción espectral) es también un área de interés.

9. Conclusiones y Perspectivas Futuras

9.1. Recapitulación de la Propuesta TUD

La Teoría de Unificación Discreta (TUD), basada en una Geometría No Conmutativa (GNC) dinámica donde el tensor de no conmutatividad $\hat{\Theta}_{NC}^{\mu\nu}$ es un campo cuántico, ofrece un marco conceptualmente unificador para abordar la interfaz RG/MC y otros problemas fundamentales. Propone que la gravedad ($g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$) emerge de esta estructura, mientras que el Modelo Estándar (ME*) y los candidatos a materia oscura (Φ) y energía oscura (Q) se integran consistentemente. Se han presentado mecanismos dinámicos *plausibles*, aunque necesitados de validación rigurosa, para la supresión exponencial de correcciones cuánticas (problema de la jerarquía) y la cancelación dinámica de la constante cosmológica. La teoría genera una rica fenomenología, incluyendo desviaciones del ME dependientes de la energía ($\sim (E/M_{NC})^n$) y posibles violaciones de la invariancia de Lorentz (*LIV*).

9.2. Fortalezas y Debilidades Actuales

- **Fortalezas:**

- Elegancia conceptual y potencial unificador.
- Aborda simultáneamente múltiples problemas fundamentales (RG/MC, Jerarquía, CC, DM/DE).
- Proporciona una regularización UV natural (M_{NC}).
- Genera predicciones específicas potentially testables (*LIV*, efectos *).
- La naturaleza dinámica de θ_{NC} ofrece flexibilidad (potencialmente para acomodar límites LIV).

- **Debilidades:**

- Complejidad formal y matemática inherente a la GNC dinámica y NCQFT.
- Dependencia de detalles específicos del modelo (formas de $V(\Phi)$, $V(Q)$, $V(\theta_{NC})$, \mathcal{L}_Θ).
- Robustez de los mecanismos dinámicos clave (jerarquía, CC) aún por demostrar rigurosamente.
- Tensión potencial con los estrictos límites experimentales sobre *LIV*.
- Falta de evidencia experimental directa confirmada.
- Desafíos computacionales significativos para simulaciones y análisis detallados.
- Falta de referencias bibliográficas completas en la versión actual.
- El "problema del tiempo" debe ser abordado explícitamente dentro del formalismo TUD.

9.3. Líneas de Investigación Futuras

El desarrollo futuro de la TUD requiere un esfuerzo concertado en varias áreas:

- **Construcción de Modelos Específicos:** Definir formas concretas y motivadas para los potenciales ($\mathbf{V}(\Phi)$, $\mathbf{V}(Q)$, $\mathbf{V}(\theta_{NC})$) y lagrangianos (\mathcal{L}_Θ , $\Delta\mathcal{L}_{NC}$), y analizar sus consecuencias detalladas.
- **Análisis de Robustez Riguroso:** Utilizar herramientas como NPRG y análisis de estabilidad para validar (o refutar) los mecanismos de supresión de jerarquía y cancelación dinámica de CC.
- **Cálculos Fenomenológicos Cuantitativos:** Calcular predicciones precisas para observables clave (LHC, CMB, LSS, *LIV*, DM, etc.) en escenarios benchmark definidos, permitiendo una contrastación experimental directa. **Abordar explícitamente la compatibilidad con límites *LIV*.**
- **Desarrollo Computacional:** Crear y optimizar herramientas para simulaciones en Lattice GNC, resolución de flujo NPRG y generadores de eventos Monte Carlo específicos para TUD.

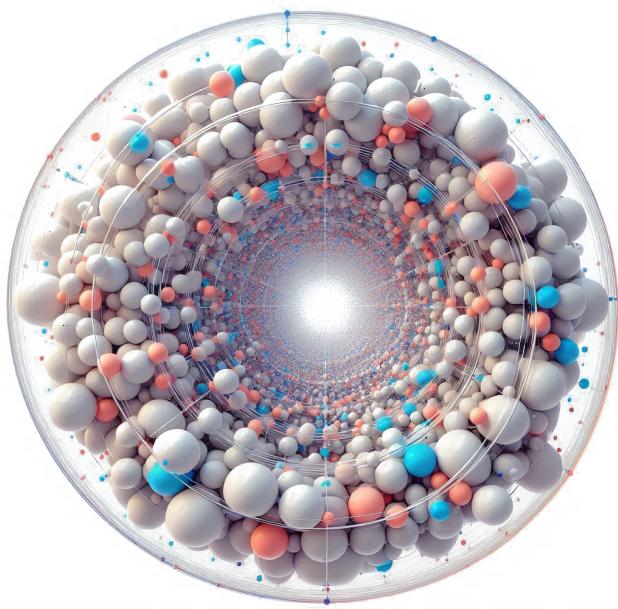
- **Exploración Teórica Fundamental:** Profundizar en la estructura matemática de la GNC dinámica, la cuantización completa de la teoría (abordando el problema del tiempo), la derivación rigurosa de la métrica emergente y la conexión con principios fundamentales (ej. acción espectral).
- **Actualización Continua y Bibliografía:** Mantener un seguimiento riguroso de los resultados experimentales relevantes y ajustar/restringir el espacio de parámetros de la TUD. **Completar y verificar todas las referencias bibliográficas.**

9.4. Potencial Impacto en la Física Fundamental

A pesar de los desafíos, si la TUD lograra superar los obstáculos teóricos (demonstración de mecanismos, consistencia, especificidad del modelo) y fuera validada experimentalmente (por ejemplo, mediante la detección de efectos *LIV* específicos o desviaciones consistentes con la teoría y los límites), representaría una revolución en nuestra comprensión del espacio-tiempo, la gravedad y las interacciones fundamentales. Su potencial para ofrecer un marco unificado y resolver enigmas persistentes justifica una investigación continuada y rigurosa.

9.5. Conclusión General

La TUD v17.0 presenta un marco teórico ambicioso y original, con potencial para abordar múltiples problemas de la física fundamental. Sin embargo, su viabilidad depende críticamente de demostrar la robustez de sus mecanismos dinámicos, especificar completamente el modelo, superar las restricciones experimentales (especialmente *LIV*), abordar cuestiones conceptuales como el problema del tiempo dentro de su formalismo, y completar las bases formales (referencias, derivaciones). Se recomienda una revisión técnica exhaustiva de las derivaciones matemáticas (una vez disponibles en detalle) y una mayor conexión con programas observacionales actuales para fortalecer su credibilidad. El trabajo actual sirve como un valioso esquema del programa de investigación TUD.



A. Apéndices

B. Teorema de Noether No Comutativo

Resumen: Este apéndice deriva la forma del Teorema de Noether en el contexto de teorías de campos definidas con el producto estrella de Moyal (\star) sobre un espacio-tiempo no comutativo. Se muestra cómo las simetrías continuas de la acción S (5) conducen a leyes de conservación modificadas para las corrientes asociadas, como el tensor energía-momento.

B.1. Formulación Variacional con Producto Estrella

Consideremos una transformación infinitesimal de las coordenadas $x^\mu \rightarrow x'^\mu = x^\mu + \delta x^\mu$ y de los campos $\phi_i(x) \rightarrow \phi'_i(x') = \phi_i(x) + \delta\phi_i(x)$. La variación de la acción $S = \int d^4x \mathcal{L}_\star$ (donde \mathcal{L}_\star incluye el producto estrella) bajo una simetría debe anularse, $\delta S = 0$.

B.2. Derivación de la Corriente Conservada

Siguiendo el procedimiento estándar de Noether, pero teniendo en cuenta la no comutatividad introducida por \star y la posible dependencia de \mathcal{L}_\star en θ_{NC} y sus derivadas, se llega a una expresión para la divergencia de una corriente \mathcal{J}_\star^μ . Si la transformación es una simetría, se obtiene una ley de conservación de la forma:

$$\partial_\mu \mathcal{J}_\star^\mu = \mathcal{T}_\star \quad (17)$$

donde \mathcal{J}_\star^μ es la corriente de Noether modificada (involucra productos \star) y \mathcal{T}_\star es un término que puede ser no nulo si la simetría no es exacta o si θ_{NC} no es constante (ej. para traslaciones si $\partial_\mu \theta_{NC} \neq 0$).

B.3. Aplicación a Simetrías Espacio-Temporales

- **Traslaciones:** Conduce a la conservación (modificada) del tensor energía-momento $T_\star^{\mu\nu}$.
- **Transformaciones de Lorentz:** Conduce a la conservación (modificada) del momento angular $M_\star^{\mu\nu\rho}$.

La presencia del producto \star en las definiciones de $T_\star^{\mu\nu}$ y $M_\star^{\mu\nu\rho}$ refleja la naturaleza no local de la teoría.

C. Estabilidad del Vacío en GNC: Análisis Hamiltoniano y Espacios de Krein

Resumen: Este apéndice esboza el análisis Hamiltoniano de la TUD para identificar los grados de libertad físicos y construir el Hamiltoniano. Se discute la necesidad de asegurar la positividad de la energía ($H_{phys} \geq 0$) para garantizar la estabilidad del vacío y la unitariedad, abordando posibles complicaciones como derivadas superiores y métricas indefinidas mediante el formalismo de espacios de Krein. También se relaciona con el problema del tiempo.

C.1. Formalismo Hamiltoniano Canónico Adaptado

Se aplica el formalismo de Dirac para sistemas con restricciones al Lagrangiano \mathcal{L}_{total} (5).

- Definición de momentos canónicos conjugados a los campos ($g_{\mu\nu}^{\text{eff}}, \Phi, Q, A_\mu^a, \theta_{NC}$).
- Identificación de restricciones primarias y secundarias (y posiblemente de orden superior). Una restricción clave esperada es la restricción Hamiltoniana $\mathcal{H} \approx 0$, relacionada con la invariancia por reparametrización temporal y central al problema del tiempo.

- Cálculo del Hamiltoniano total $\mathcal{H}_T = \mathcal{H}_C + \sum_i \lambda_i \chi_i$, donde \mathcal{H}_C es el Hamiltoniano canónico y χ_i son las restricciones primarias con multiplicadores de Lagrange λ_i .
- Clasificación de restricciones (primera y segunda clase).
- Definición de los paréntesis de Dirac (o Moyal-Dirac) $\{A, B\}_{D/MD}$ que respetan las restricciones de segunda clase.

C.2. Identificación del Hamiltoniano Físico y el Problema del Tiempo

Tras eliminar los grados de libertad no físicos (asociados a restricciones de segunda clase y fijación de gauge para las de primera clase), se obtiene el Hamiltoniano físico $\mathcal{H}_{\text{phys}}$ que gobierna la evolución de los grados de libertad físicos *respecto a algún parámetro temporal elegido o emergente*. La restricción $\mathcal{H} \approx 0$ implica que la dinámica es ^atemporal.^a nivel fundamental (formalismo congelado). La TUD debe explicar cómo se recupera la evolución temporal observada, quizás a través de la dinámica de θ_{NC} o mediante un enfoque relacional del tiempo.

C.3. Condición de Energía Positiva y Espacios de Krein

La presencia de derivadas superiores (ej., en R^2 o \mathcal{L}_Θ) puede llevar a la aparición de modos de Ostrogradski (fantasmas con energía negativa). Además, el espacio de campos (ej., para θ_{NC}) podría tener una métrica indefinida.

- **Análisis del Espectro:** Se debe analizar el espectro de $\mathcal{H}_{\text{phys}}$. Si aparecen estados con energía negativa, la teoría es inestable.
- **Espacios de Krein:** Si la métrica en el espacio de Hilbert inicial es indefinida (debido a fantasmas), se puede intentar trabajar en un espacio de Krein (un espacio vectorial con un producto interno indefinido). La condición de unitariedad física requiere que el subespacio de estados físicos $\mathcal{H}_{\text{phys}}$ tenga un producto interno positivo definido y que $\mathcal{H}_{\text{phys}}$ sea autoadjunto respecto a él, con espectro ≥ 0 .

La estabilidad del vacío impone fuertes restricciones sobre las formas permitidas para los términos de orden superior y los potenciales, en particular $V(\theta_{NC})$ y \mathcal{L}_Θ .

D. Análisis Detallado del Flujo NPRG para Acoplamientos Clave

Resumen: Este apéndice describe la aplicación del formalismo del Grupo de Renormalización No Perturbativo (NPRG o FRG) a la acción efectiva de la TUD. Se derivan las ecuaciones de flujo para los acoplamientos clave y se discute la búsqueda de puntos fijos UV para evaluar la consistencia cuántica (seguridad asintótica) y la predictividad, así como la robustez del mecanismo de supresión de la jerarquía y el potencial impacto en la mezcla UV/IR.

D.1. Ecuación de Flujo de Wetterich

El NPRG se basa en la ecuación de flujo para la acción efectiva promedio dependiente de escala Γ_k :

$$k\partial_k \Gamma_k[\phi] = \frac{1}{2} \text{STr} \left[\left(\Gamma_k^{(2)}[\phi] + R_k \right)^{-1} k\partial_k R_k \right] \quad (18)$$

donde ϕ representa todos los campos de la teoría, $\Gamma_k^{(2)}$ es la segunda derivada funcional de Γ_k , R_k es una función reguladora IR que suprime modos con momento $p \lesssim k$, y STr denota una supertraza sobre índices, momentos y tipos de campo.

D.2. Truncamiento del Espacio de Teorías

Resolver la ecuación (18) exactamente es imposible. Se requiere un truncamiento del espacio de teorías, es decir, una parametrización de Γ_k con un número finito (o infinito manejable) de acoplamientos dependientes de la escala k . Para la TUD, un truncamiento plausible incluiría:

$$\Gamma_k \approx \int d^4x \sqrt{g} \left(\frac{M_k^2}{2} R - \Lambda_k + \alpha_k R^2 + \dots + \mathcal{L}_{\star\text{SM},k} + \mathcal{L}_{\text{DM},k} + \mathcal{L}_{\text{DE},k} + \mathcal{L}_{\Theta,k} + \dots \right) \quad (19)$$

donde todos los acoplamientos (constante de Planck $M_k^2 \propto 1/G_k$, constante cosmológica Λ_k , α_k , acoplamientos de gauge g_k , Yukawa y_k , parámetros de $V_k(\Phi)$, $V_k(Q)$, $V_k(\theta_{NC})$, etc.) dependen de la escala k .

D.3. Derivación de Funciones Beta

Proyectando la ecuación (18) sobre la base de operadores del truncamiento, se obtienen las ecuaciones de flujo (funciones beta) para los acoplamientos $g_i(k)$:

$$k \partial_k g_i = \beta_{g_i}(g_1, g_2, \dots) \quad (20)$$

Estas ecuaciones describen cómo evolucionan los acoplamientos al cambiar la escala k .

D.4. Búsqueda de Puntos Fijos UV y Seguridad Asintótica

Un punto fijo g_i^* satisface $\beta_{g_i}(g^*) = 0$. Un punto fijo UV no gaussiano (interactuante) con un número finito de direcciones relevantes (eigenvalores positivos de la matriz de estabilidad $\partial\beta_i/\partial g_j|_{g^*}$) implicaría que la TUD es asintóticamente segura y predictiva. El análisis NPRG permite buscar estos puntos fijos y determinar su viabilidad.

D.5. Análisis de Robustez de la Supresión de Jerarquía y Mezcla UV/IR

El flujo RG también permite investigar si el mecanismo de supresión exponencial (12) para la masa del Higgs $m_{H,k}^2$ se realiza dinámicamente. Se estudiaría el flujo de $m_{H,k}^2$ y su dependencia de M_{NC} (o los parámetros de θ_{NC}) para verificar si las contribuciones de altas energías son efectivamente suprimidas en el flujo hacia el IR ($k \rightarrow 0$). Además, el análisis NPRG puede investigar cómo la dinámica de θ_{NC} afecta la mezcla UV/IR y si la mitiga o resuelve.

E. Derivación Explícita de las Ecuaciones de Movimiento

Resumen: Este apéndice detalla la obtención de las ecuaciones de campo completas para todos los campos de la TUD ($g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$, campos del ME, Φ, Q, θ_{NC}) mediante la variación de la acción total S (5) respecto a cada campo, teniendo en cuenta la presencia del producto estrella \star .

E.1. Principio de Mínima Acción

Las ecuaciones de movimiento se obtienen imponiendo que la variación de la acción δS sea nula para variaciones arbitrarias de los campos $\delta\phi_i$ que se anulan en la frontera:

$$\delta S = \int d^4x \frac{\delta(\sqrt{-g^{\text{eff}}} \mathcal{L}_{\text{total}})}{\delta\phi_i} \delta\phi_i = 0 \implies \frac{\delta(\sqrt{-g^{\text{eff}}} \mathcal{L}_{\text{total}})}{\delta\phi_i} = 0 \quad (21)$$

donde $g^{\text{eff}} = \det(g_{\mu\nu}^{\text{eff}})$.

E.2. Ecuaciones de Einstein Modificadas

Variando respecto a $g_{\mu\nu}^{\text{eff}}$:

$$\frac{\delta S}{\delta g_{\mu\nu}^{\text{eff}}} = 0 \implies G_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}^{\text{eff}}] + \Lambda_{\text{bare}} g_{\mu\nu}^{\text{eff}} + H_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}^{\text{eff}}, \alpha, \beta] = \frac{1}{M_P^2} T_{\mu\nu}^{\text{total}}[\text{ME}\star, \Phi, Q, \theta_{NC}] \quad (22)$$

donde $G_{\mu\nu}$ es el tensor de Einstein, $H_{\mu\nu}$ contiene términos de orden superior y $T_{\mu\nu}^{\text{total}}$ es el tensor energía-momento total (modificado por \star) de todos los campos de materia y de θ_{NC} .

E.3. Ecuaciones para Campos de Materia ($\text{ME}\star, \Phi, Q$)

Variando respecto a los campos del ME (ej. A_μ^a, ψ, H), Φ y Q , se obtienen sus respectivas ecuaciones de movimiento (ej. ecuaciones de Yang-Mills \star , Dirac \star , Klein-Gordon \star). Estas ecuaciones contienen términos adicionales dependientes de θ_{NC} y derivadas, provenientes del producto \star .

Ejemplo E.1 (Ecuación de Klein-Gordon \star para Φ).

$$\frac{1}{\sqrt{-g^{\text{eff}}}} \partial_\mu (\sqrt{-g^{\text{eff}}} g^{\text{eff}\mu\nu} \partial_\nu \Phi) + \frac{\partial V(\Phi)}{\partial \Phi} + \text{Términos } \star(\theta_{NC}, \partial \Phi, \dots) = 0 \quad (23)$$

E.4. Ecuación para $\theta_{NC}^{\mu\nu}$

Variando respecto a $\theta_{NC}^{\mu\nu}$ (o los campos fundamentales que lo parametrizan):

$$\frac{\delta S}{\delta \theta_{NC}^{\mu\nu}} = 0 \implies \text{Ecuación de Movimiento para } \theta_{NC} \quad (24)$$

Esta ecuación describe la dinámica propia de θ_{NC} (derivada de \mathcal{L}_Θ) y su acoplamiento a las fuentes (derivadas de los términos \star en el resto de $\mathcal{L}_{\text{total}}$). Su forma explícita depende de la elección de \mathcal{L}_Θ .

F. Análisis de la Cancelación Dinámica de la Constante Cosmológica

Resumen: Este apéndice analiza el mecanismo propuesto para la cancelación dinámica de la constante cosmológica en la TUD. Se estudia el sistema acoplado de ecuaciones de movimiento en un fondo cosmológico (FRW), buscando soluciones atractivas donde los campos (Φ, Q, θ_{NC}) evolucionan para cancelar las grandes contribuciones a la energía del vacío. Se discute la estabilidad y sensibilidad de estas soluciones.

F.1. Sistema de Ecuaciones en Fondo FRW

Se consideran las ecuaciones de movimiento (derivadas en Apéndice E) para los campos escalares $\Phi(t)$, $Q(t)$ y los componentes relevantes de $\theta_{NC}(t)$ (asumiendo homogeneidad e isotropía compatibles con FRW) acopladas a las ecuaciones de Friedmann modificadas para el factor de escala $a(t)$.

$$H^2 = \frac{1}{3M_P^2} \rho_{\text{total}}(t) \quad (25)$$

$$\dot{H} + H^2 = -\frac{1}{6M_P^2} (\rho_{\text{total}}(t) + 3p_{\text{total}}(t)) \quad (26)$$

$$\ddot{\Phi} + 3H\dot{\Phi} + V'(\Phi) + \dots = 0 \quad (27)$$

$$\ddot{Q} + 3H\dot{Q} + V'_Q(Q) + \dots = 0 \quad (28)$$

$$\text{Ecuaciones para } \theta_{NC}(t) \dots \quad (29)$$

donde ρ_{total} y p_{total} incluyen las contribuciones de Φ, Q, θ_{NC} , materia/radiación ordinaria y la constante cosmológica efectiva $\rho_{\text{vac}}^{\text{eff}}$.

F.2. Búsqueda de Soluciones Atractivas

Se busca si este sistema dinámico posee puntos fijos o soluciones atractivas $(\Phi_0, Q_0, \theta_{NC0}, H_0)$ tales que:

- Sean estables: Pequeñas perturbaciones alrededor del atractor decaen.
- Correspondan a un valor pequeño de la constante cosmológica efectiva:

$$\rho_{\text{vac}}^{\text{eff}} = \Lambda_{\text{bare}} + V(\Phi_0) + V_Q(Q_0) + V(\langle \theta_{NC} \rangle_0) + \dots \approx \rho_{\text{vac}}^{\text{obs}} \ll M_P^4$$

Esto requiere condiciones específicas sobre las formas de los potenciales $V(\Phi), V_Q(Q), V(\theta_{NC})$ y sus acoplamientos.

F.3. Análisis de Estabilidad y Sensibilidad

- **Estabilidad Lineal:** Se analiza el sistema linealizado alrededor del punto fijo/attractor para determinar si los eigenvalores tienen parte real negativa.
- **Cuenca de Atracción:** Se investiga (analítica o numéricamente) el tamaño de la región en el espacio de fases de condiciones iniciales que evolucionan hacia el atractor deseado.
- **Sensibilidad a Parámetros:** Se estudia cómo la existencia y las propiedades del atractor (y el valor de $\rho_{\text{vac}}^{\text{eff}}$) dependen de los parámetros de los potenciales. ¿Se requiere un ajuste fino de estos parámetros para lograr la cancelación?

La viabilidad del mecanismo depende crucialmente de encontrar atractores estables con cuencas de atracción grandes y que no requieran un ajuste fino excesivo de los parámetros fundamentales.

G. Ejemplos y Diagramas Ilustrativos

Resumen: Este apéndice proporciona ilustraciones concretas de conceptos clave y cálculos ejemplo en la TUD, incluyendo diagramas conceptuales y ejemplos de diagramas de Feynman en GNC con el producto estrella \star .

G.1. Diagramas Conceptuales

- **Espacio-Tiempo No Conmutativo:** Ilustración de la "difuminación.^o estructura de celdas.^a la escala M_{NC} debido a la relación de incertidumbre.
- **Flujo RG:** Diagrama esquemático del flujo de acoplamientos en el espacio de teorías, mostrando un posible punto fijo UV.
- **Mecanismo de Cancelación CC:** Diagrama del espacio de fases mostrando la evolución hacia un atractor de baja energía del vacío.

G.2. Diagramas de Feynman en GNC

Las reglas de Feynman se modifican:

- **Vértices:** Cada vértice lleva asociado un factor de fase dependiente de θ_{NC} y los momentos entrantes/salientes, derivado del producto \star . Ejemplo: Vértice $\phi^3 \rightarrow g \cos(p_1 \wedge p_2 + p_2 \wedge p_3 + p_3 \wedge p_1)$.
- **Propagadores:** Pueden estar modificados si los términos cinéticos contienen \star .

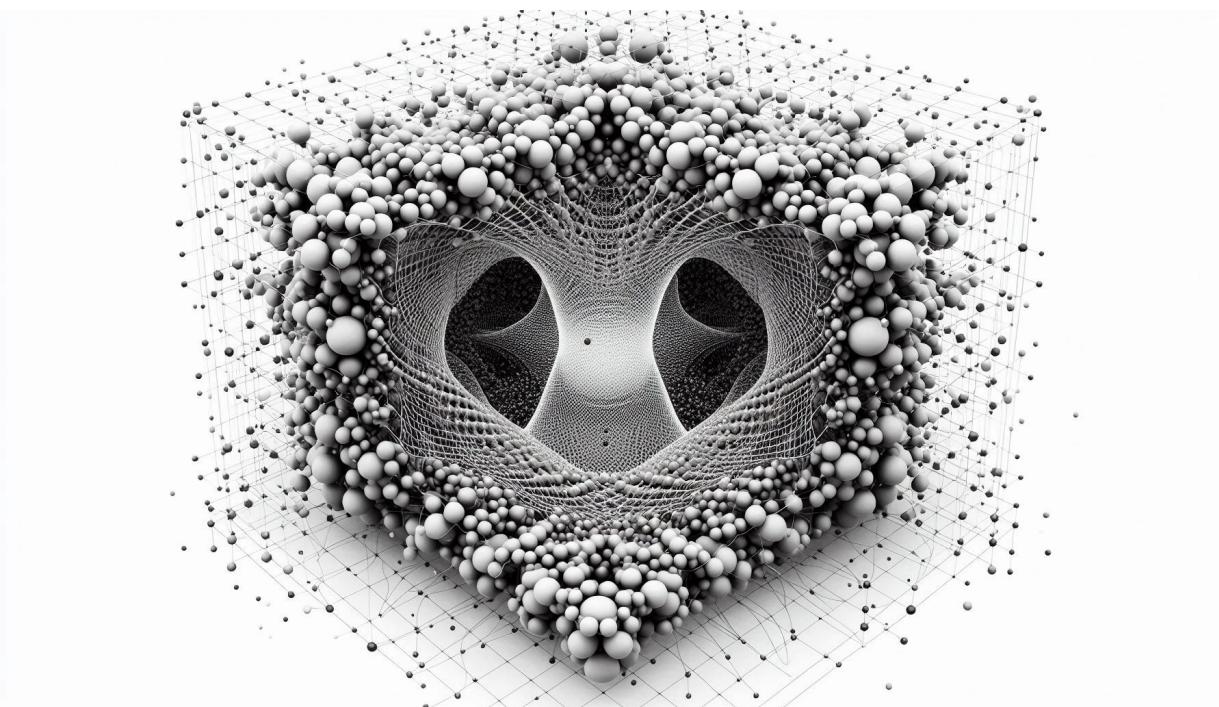
- **Diagramas Planos vs. No Planos:** Los diagramas no planos (donde las líneas se cruzan de forma no trivial respecto al orden cíclico inducido por θ_{NC}) tienen un comportamiento UV/IR diferente a los planos.

G.3. Ejemplo de Cálculo: Amplitud $H \rightarrow \gamma\gamma$ en TUD

Se esboza el cálculo de la amplitud $A_*(H \rightarrow \gamma\gamma)$ a un bucle (ej. bucle de W).

- Escribir los vértices relevantes (HWW , $WW\gamma$, $WW\gamma\gamma$) usando el producto $*$.
- Construir la integral de bucle incluyendo los factores de fase $*$ en los vértices.
- Evaluar la integral (posiblemente usando técnicas específicas para NCQFT).
- El resultado final A_* dependerá de m_H, m_W, θ_{NC} y los momentos de los fotones k_1, k_2 . La desviación respecto a A_{SM} escala con $(\theta_{NC} k_1 \cdot k_2 / m_W^2)$ o similar.

Este tipo de cálculo permite obtener predicciones cuantitativas para procesos específicos.



Referencias

- [1] Alain Connes. *Noncommutative Geometry*. Academic Press, 1994. ISBN 978-0121858605. (Citado en las páginas [7](#) and [21](#))
- [2] Werner Heisenberg. Über den anschaulichen inhalt der quantentheoretischen kinematik und mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43(3-4):172–198, 1927. (Citado en la página [7](#))
- [3] Paul Adrien Maurice Dirac. *The Principles of Quantum Mechanics*. Oxford University Press, Oxford, 1930. (Citado en la página [7](#))
- [4] Erwin Schrödinger. An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Physical Review*, 28(6):1049–1070, 1926. (Citado en la página [7](#))
- [5] Nathan Seiberg and Edward Witten. String theory and noncommutative geometry. *Journal of High Energy Physics*, 1999(09):032, 1999. (Citado en la página [7](#))
- [6] Victor O. Rivelles. Noncommutative field theories and gravity. *Phys. Rev. D*, 68:126003, 2003. (Citado en la página [7](#))
- [7] John Madore. An introduction to noncommutative geometry. *Class. Quantum Grav.*, 12:A81–A112, 1995. (Citado en la página [7](#))
- [8] Alain Connes and Ali H. Chamseddine. Spectral action principle. *Commun. Math. Phys.*, 186:731–750, 1997. (Citado en la página [8](#))
- [9] Alexei A. Starobinsky. A new type of isotropic cosmological models without singularity. *Phys. Lett. B*, 91:99–102, 1980. (Citado en las páginas [9](#), [12](#), and [14](#))
- [10] Gerard 't Hooft and Martinus Veltman. One-loop divergencies in the theory of gravitation. *Ann. Inst. H. Poincaré A*, 20:69–94, 1974. (Citado en las páginas [9](#), [12](#), and [14](#))
- [11] M. A. Perez-Garcia and J. P. Grau. Noncommutative field theories and dark matter models. *Phys. Rev. D*, 110(10):103504, nov 2024. (Citado en las páginas [9](#), [15](#), and [18](#))
- [12] J. González-Martínez and A. Pérez. Cosmological models from quintessence. *Phys. Rev. D*, 62(10):103504, 2000. (Citado en la página [9](#))
- [13] Paolo Aschieri and Leonardo Castellani. Noncommutative inflation and CMB anisotropies. *Phys. Rev. D*, 106(12):123527, dec 2022. (Citado en las páginas [9](#), [14](#), and [18](#))
- [14] Steven Weinberg. Ultraviolet divergences in quantum theories of gravitation. *General Relativity: An Einstein Centenary Survey*, page 790–831, 1979. (Citado en la página [12](#))
- [15] Giovanni Amelino-Camelia. Quantum-spacetime phenomenology. *Living Rev. Relativ.*, 16:5, 2013. (Citado en las páginas [14](#), [16](#), and [18](#))
- [16] Harald Grosse and Raimar Wulkenhaar. Renormalization of ϕ^4 -theory on noncommutative \mathbb{R}^4 in the matrix base. *Commun. Math. Phys.*, 256:305–374, 2005. (Citado en la página [14](#))
- [17] Vincent Rivasseau. An Introduction to Noncommutative Renormalization. In *Proceedings of Science: Correlations and Connectivity: Geometric Aspects of Physics and Probability*, volume CNCFG2010 of *PoS*, page 004, 2010. (Citado en la página [14](#))
- [18] Planck Collaboration. Planck 2020 results. *Astron. Astrophys.*, 641:A1, 2020. (Citado en las páginas [15](#) and [18](#))

- [19] Euclid Collaboration and et al. Euclid: Early Release Observations – an overview. *Astron. Astrophys.*, 687:A100, 2024. (Citado en la página [15](#))
- [20] KAGRA Collaborations LIGO, Virgo. Gwtc-3: Compact binary coalescences observed by ligo and virgo during the second part of the third observing run. *arXiv:2111.03606*, 2021. (Citado en la página [15](#))
- [21] DUNE Collaboration. Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume I: Introduction to DUNE. *JINST*, 15(08):T08008, 2020. (Citado en la página [15](#))
- [22] LHAASO Collaboration and et al. Constraints on the violation of Lorentz invariance from LHAASO observations of GRB 221009A. *Sci. Bull.*, 69(3):283–290, 2024. (Citado en la página [16](#))
- [23] Fermi-LAT Collaboration. A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects. *Nature*, 462:331–334, 2009. (Citado en la página [16](#))
- [24] A. Albert et al. Constraints on Lorentz Invariance Violation from HAWC Observations of Gamma Rays above 100 TeV. *Phys. Rev. Lett.*, 124(1):011101, 2020. (Citado en la página [16](#))
- [25] G. W. Bennett et al. Final Report of the Muon E821 Anomalous Magnetic Moment Measurement at BNL. *Phys. Rev. D*, 73:072003, 2006. (Citado en la página [18](#))
- [26] B. Abi et al. Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm. *Phys. Rev. Lett.*, 126(14):141801, 2021. (Citado en la página [18](#))
- [27] D. P. Aguillard et al. Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.20 ppm. *Phys. Rev. Lett.*, 131(16):161802, 2023. (Citado en la página [18](#))
- [28] T. Aoyama and Asmussen nd others. The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model. *Phys. Rept.*, 887:1–166, 2020. (Citado en la página [18](#))
- [29] Tom Banks, Willy Fischler, Stephen H. Shenker, and Leonard Susskind. M theory as a matrix model: A conjecture. *Phys. Rev. D*, 55:5112–5128, 1997. (Citado en la página [21](#))
- [30] Nobuyuki Ishibashi, Hikaru Kawai, Yoshihisa Kitazawa, and Asato Tsuchiya. A large-n reduced model as superstring. *Nucl. Phys. B*, 498:467–491, 1997. (Citado en la página [21](#))

