

Teoria do universo discreto: extensão efetiva unificada a partir de uma rede causal fractal

Discrete universe theory: a unified effective extension based on a fractal causal network

Denivaldo Lima¹

Resumo

Apresentamos a Teoria do Universo Discreto (TUD), uma Teoria Efetiva de Campos (EFT) cuja completude ultravioleta (UV) é descrita por uma rede causal discreta com dimensão espectral fractal $D_f \approx 2,72$, inspirada nas Triangulações Dinâmicas Causais (CDT). Nesta abordagem, o espaço-tempo contínuo emerge de uma estrutura discreta fundamental composta por elementos causais interconectados, enquanto a matéria, os campos e as interações observadas resultam de excitações coletivas dessa rede.

A análise espectral do laplaciano da rede revela uma hierarquia auto-similar de autovalores governada pela razão áurea ($\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$), originando uma torre discreta de modos de Kaluza-Klein interpretada como a estrutura fractal interna dos quarks. A teoria introduz três campos escalares complexos fundamentais Φ_h , Φ_l e Φ_m , associados a diferentes densidades de vácuo e responsáveis pela geração das propriedades observáveis da matéria, da massa, das interações e da estrutura cosmológica. O campo Φ_m atua como componente unificadora entre os setores gravitacional, escuro e cosmológico, enquanto um campo emergente de coerência macroscópica Ψ_c descreve estados coletivos organizados do vácuo.

A ação efetiva preserva a simetria de gauge $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times U(1)_D$, incorporando um fóton escuro massivo A'_μ e permitindo a coexistência estável entre matéria e antimatéria. O eletromagnetismo é reinterpretado como manifestação dinâmica de pares fundamentais h^+ e h^- , dos quais emergem

¹ Engenheiro de Telecomunicações

E-mail: denivlima@yahoo.com.br

naturalmente os campos elétrico e magnético, a dualidade onda-partícula da luz e a Lei dos Semelhantes, proposta como princípio microscópico responsável pelo alinhamento magnético e pelo comportamento de ímãs macroscópicos sem violação da lei de Gauss.

O modelo incorpora ainda uma quinta dimensão escura associada ao campo Φ_m , responsável pelo movimento holográfico, pela interpretação do tunelamento quântico como trânsito através da dimensão da energia e pela existência de correlações não locais fortemente suprimidas em escalas macroscópicas. A luz corpuscular surge como uma solução solitônica longitudinal do campo eletromagnético efetivo, enquanto a constante de Planck local passa a depender dinamicamente da densidade do vácuo.

No setor cosmológico, a teoria prevê um universo cíclico com fases alternadas de sístole e diástole, governadas pela dinâmica dos campos fundamentais. Um ajuste MCMC utilizando dados de Planck 2018, BAO e Pantheon+ produz $H_0 = 73,2 \pm 1,3$ km/s/Mpc e evidência bayesiana positiva ($\ln B = +3,2$) em relação ao modelo Λ CDM. Todos os vínculos experimentais atualmente considerados — incluindo LHC, quinta-força, fótons escuros, testes de Lorentz e QED de precisão — permanecem satisfeitos dentro do espaço de parâmetros analisado.

A teoria propõe um arcabouço unificado no qual espaço-tempo, matéria, campos, gravidade, magnetismo e cosmologia emergem de uma única estrutura causal discreta e fractal, fornecendo previsões observacionais falsificáveis e recuperando, nos limites apropriados, a Relatividade Geral e o Modelo Padrão.

Palavras-chave: Teoria de campo unificada; campo unificador; equações de Einstein estendidas; rede causal; dimensão fractal; fóton escuro; EFT; gravidade quântica; movimento holográfico; universo cíclico; lei dos semelhantes; levitação acústica; acoplamento vibracional.

Abstract

We present the Discrete Universe Theory (DUT), an Effective Field Theory (EFT) whose ultraviolet (UV) completion is described by a discrete causal network with spectral fractal dimension $D_f \approx 2.72$, inspired by Causal Dynamical Triangulations (CDT). In this approach, continuous spacetime emerges from a fundamental discrete structure composed of interconnected causal elements, while matter, fields, and observed interactions result from collective excitations of this network.

Spectral analysis of the network Laplacian reveals a self-similar hierarchy of eigenvalues governed by the golden ratio ($\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$), giving rise to a discrete tower of Kaluza-Klein modes interpreted as the internal fractal structure of quarks. The theory introduces three fundamental complex scalar fields Φ_h , Φ_l , and Φ_m , associated with different vacuum densities and responsible for generating the observable properties of matter, mass, interactions, and cosmological structure.

The Φ_m field acts as a unifying component among the gravitational, dark, and cosmological sectors, while an emergent macroscopic coherence field Ψ_c describes organized collective states of the vacuum.

The effective action preserves the gauge symmetry $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times U(1)_D$, incorporating a massive dark photon A'_μ and enabling stable coexistence between matter and antimatter. Electromagnetism is reinterpreted as a dynamical manifestation of fundamental pairs h^+ and h^- , from which the electric and magnetic fields, the wave-particle duality of light, and the Law of Similars naturally emerge — proposed as a microscopic principle responsible for magnetic alignment and the behavior of macroscopic magnets without violating Gauss's law.

The model further incorporates a fifth dark dimension associated with the Φ_m field, responsible for holographic movement (holomovement), for the interpretation of quantum tunneling as transit through the energy dimension, and for the existence of non-local correlations strongly suppressed at macroscopic scales. Corpuscular light arises as a longitudinal solitonic solution of the effective electromagnetic field, while the local Planck constant becomes dynamically dependent on the vacuum density.

In the cosmological sector, the theory predicts a cyclic universe with alternating phases of systole and diastole, governed by the dynamics of the fundamental fields. An MCMC fit using data from Planck 2018, BAO, and Pantheon+ yields $H_0 = 73.2 \pm 1.3$ km/s/Mpc and positive Bayesian evidence ($\ln B = +3.2$) relative to the Λ CDM model. All currently considered experimental bounds — including LHC, fifth-force, dark photons, Lorentz tests, and precision QED — remain satisfied within the analyzed parameter space.

The theory proposes a unified framework in which spacetime, matter, fields, gravity, magnetism, and cosmology emerge from a single discrete, causal, fractal structure, providing falsifiable observational predictions and recovering, in the appropriate limits, General Relativity and the Standard Model.

Keywords: Unified field theory; unifying field; extended Einstein equations; causal network; fractal dimension; dark photon; EFT; quantum gravity; holomovement; cyclic universe; law of similars; acoustic levitation; vibrational coupling.

1. Introdução

As Triangulações Dinâmicas Causais (CDT) demonstram que o espaço-tempo quântico pode emergir de uma rede causal discreta com dimensão espectral fractal $D_f \approx 2,72$ na escala de Planck [1,2]. Essa estrutura discreta oferece uma possível solução para a não renormalizabilidade da Relatividade Geral (RG) e abre caminho para uma teoria quântica da gravidade. Paralelamente, a necessidade de explicar a matéria escura, a energia escura, a assimetria bariônica e a recente tensão na constante de Hubble motiva extensões do

Modelo Padrão (MP) com novos graus de liberdade, como campos escalares e portais de matéria escura [3,4].

Neste trabalho, ancoramos uma Teoria Efetiva de Campos (EFT) na UV completion fornecida pelas CDT. A integral de trajetória sobre geometrias trianguladas é bem definida, finita e unitária. A análise espectral do laplaciano da rede fornece uma torre de Kaluza-Klein auto-similar, cujos modos interpretamos como a origem da estrutura fractal dos quarks — um conceito que encontra eco em abordagens especulativas [5,6], mas que aqui recebe uma formulação matemática rigorosa.

A ação efetiva resultante estende o MP e a RG com três campos escalares complexos Φ_t ($t = h, l, m$) que codificam as densidades elementares de vácuo, um campo emergente de coerência macroscópica Ψ_c (análogo a um parâmetro de ordem) e um fóton escuro massivo A'_μ . A simetria de gauge $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times U(1)_D$ é mantida, onde o novo $U(1)_D$ distingue setores material e escuro, explicando a coexistência matéria-antimatéria sem aniquilação catastrófica.

O artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 detalha a UV completion e a análise espectral, derivando a torre KK e a estrutura fractal. A Seção 3 apresenta a ação efetiva completa, com todos os setores e interações, e demonstra a estabilidade clássica, a ausência de fantasmas e a unitariedade óptica. A Seção 4 lista e descreve as 17 equações principais e as 3 de suporte, com suas implicações físicas e recuperação dos limites clássicos. Inclui a derivação da lei dos semelhantes no magnetismo (Seção 4.1). A Seção 5 descreve o ajuste cosmológico quantitativo via MCMC, com parâmetros, likelihoods, resultados e evidência bayesiana, incluindo a evolução cíclica do universo. A Seção 6 confronta o modelo com vínculos experimentais (LHC, quinta-força, QED, violação de Lorentz, fótons escuros) e apresenta a previsão corrigida para o ALPS II. A Seção 7 discute as limitações do modelo e as estratégias para superá-las. A Seção 8 conclui o trabalho.

2. UV Completion: Rede Causal Discreta e Análise Espectral

2.1 Integral de Trajetória na Rede Causal

A teoria fundamental é definida por uma soma sobre todas as variedades trianguladas quadridimensionais com topologia fixa e estrutura causal, conforme as CDT [1,2]. A ação é a de Regge [7] com campos de matéria alocados nos vértices:

$$S_{UV} = \sum_{\text{simplices}} \left[\frac{1}{8\pi G} (\delta - \Lambda a^2) V_4 + \mathcal{L}_{\text{campos}} V_4 \right],$$

(UV.1)

onde δ é o déficit angular, $a \sim l_p$ o espaçamento da rede, e V_4 o volume quadridimensional do simplexo. Os campos escalares Φ_t e fermiônicos ψ

residem nos vértices, com derivadas discretas covariantes definidas por diferenças finitas ao longo dos links.

A função de partição é

$$Z = \sum_{T \in CDT} \frac{1}{C_T} \int \mathcal{D}\Phi e^{-S_{UV}[T, \Phi]} , \quad (\text{UV.2})$$

onde C_T é o fator de simetria da triangulação T . A soma sobre geometrias é finita para cada volume fixo.

Unitariedade: A continuação euclidiana da integral de trajetória satisfaz a positividade de reflexão de Osterwalder-Schrader [8], garantindo um espaço de Hilbert físico com produto interno positivo e evolução unitária após rotação de Wick. A medida de integração é positiva definida, e a ação quadrática é limitada inferiormente, eliminando estados fantasmas (ghosts).

2.2 Análise Espectral do Laplaciano CDT

Na fase de emergência geométrica, o laplaciano efetivo sobre a rede possui um espectro discreto com auto-similaridade [2]. Escrevemos o operador discretizado na rede de Regge como:

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{g(x)}} \sum_{y \sim x} \frac{A_{xy}}{l_{xy}^2} [\phi(y) - \phi(x)] , \quad (2.1)$$

onde $g(x)$ é o volume dual ao vértice x , A_{xy} é a área da face dual ao link xy , e l_{xy} é o comprimento do link. A condição de causalidade restringe os links a serem do tipo tempo ou espaço.

A densidade espectral de estados $\rho(\lambda)$ para grandes volumes comporta-se como

$$\rho(\lambda) \propto \lambda^{D_f/2-1} + \text{correções periódicas em } \ln \lambda. \quad (2.2)$$

A invariância de escala discreta, característica de fractais, exige que a densidade de estados satisfaça

$$\rho(\lambda) = \phi^{-D_f/2} \rho(\lambda/\phi), \quad (2.3)$$

para algum fator de escala ϕ . A solução de (2.3) é $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1,618$, a razão áurea. Isso decorre da equação funcional $f(x) = f(\phi x)$, cuja solução minimal é a proporção áurea, que aparece naturalmente em sistemas com invariância de escala discreta [9].

Os autovalores λ_n são obtidos resolvendo a equação de autovalores na rede:

$$\phi_n = \lambda_n \phi_n.$$

(2.4)

A auto-similaridade impõe que a sequência de autovalores seja geométrica:

$$\lambda_n = \lambda_0 \phi^{2n/D_f}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.5)$$

A relação de dispersão na rede é $\lambda_n \propto M_n^2$; portanto, as massas dos modos KK são:

$$M_n = M_0 \phi^{n/D_f}, \quad (2.6)$$

com M_0 a escala fundamental. A normalização da função de onda no volume fractal impõe

$$N_n = \phi^{n(1-2/D_f)}, \quad (2.7)$$

de modo que a integral $\int dV_f |\psi_n|^2 = 1$.

2.3 Torre KK e Quarks Fractais

O campo fermiônico efetivo (quark) é a superposição dos modos KK:

$$q(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{N_n}} \psi_n(x) \prod_{t=h,l,m} (1 + \lambda_{st} \mathcal{O}_t(\Phi_t)) q_0, \quad (2.8)$$

onde $\psi_n(x)$ é o campo 4D de massa M_n , $\mathcal{O}_t(\Phi_t)$ são operadores de projeção de sabor, e q_0 é o campo fermiônico fundamental do MP. Para energias $E \ll M_1$, apenas o modo $n = 0$ contribui, recuperando exatamente os férmions do MP. A série é convergente e local, pois as massas crescem exponencialmente com n .

2.4 Movimento holográfico e a Quinta Dimensão Escura

A estrutura da rede CDT revela, além das quatro dimensões do espaço-tempo, uma quinta dimensão "escura" compactada, cujo tamanho efetivo é controlado pelo campo Φ_m . Esta dimensão extra permite a transferência instantânea de informação entre duas superfícies Σ_1 e Σ_2 separadas por uma distância L , sem violação da causalidade macroscópica. A entropia de emaranhamento entre as duas superfícies adquire um termo não local (movimento holográfico), cuja manifestação no setor visível é suprimida pelo acoplamento ϵ :

$$S_{\text{holo}} = \epsilon^2 \frac{k_B c^3}{4G\hbar} \frac{A_1 A_2}{L^2} e^{-L/\lambda_D} \left[1 + \beta \frac{\lambda_D^2}{L^2} \ln \left(\frac{L^2}{\lambda_D^2} \right) \right]. \quad (2.9)$$

Aqui, A_1 e A_2 são as áreas das duas superfícies, e $\lambda_D = \frac{\hbar c}{m_{A'}}$ é o comprimento de desacoplamento dimensional, controlado pela massa do fóton escuro $m_{A'}$ (o primeiro modo excitado da torre KK na direção da quinta dimensão). O fator ϵ^2 reflete o acoplamento entre o setor escuro e o visível. Para distâncias $L \gg \lambda_D$, o termo é exponencialmente suprimido, recuperando a holografia padrão. Este mecanismo é a base da ação à distância e da interconexão universal entre todas as partículas.

3. Ação Efetiva e Estabilidade

3.1 Ação Efetiva da EFT

A ação de baixa energia, obtida por coarse-graining da rede, é:

$$S_{\text{EFT}} = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2\kappa} R + \mathcal{L}_\phi + \mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}_\psi + \mathcal{L}_{\text{mistura}} + \mathcal{L}_{\text{int}} \right], \quad (\text{A})$$

com $\kappa = 8\pi G/c^4$.

\mathcal{L}_{SM} é a lagrangiana completa do Modelo Padrão com grupo de gauge $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$, três gerações de férmions, bóson de Higgs, acoplamentos de Yukawa e matrizes de mistura CKM e PMNS. As anomalias de gauge se cancelam exatamente como no MP. O running dos acoplamentos segue as funções beta do MP em baixas energias, recebendo correções dos novos campos apenas acima de M_0 .

3.1.1 Setor de Campos de Densidade de Vácuo Φ_t

$$\mathcal{L}_\phi = \sum_{t=h,L,m} \left[|D_\mu \Phi_t|^2 - \lambda_t (|\Phi_t|^2 - v_t^2)^2 \right] - \Lambda_{\text{escura}}^4 \left[1 - \cos\left(\frac{\Phi_m}{f}\right) \right], \quad (\text{L1})$$

onde a derivada covariante sob o grupo $U(1)_D$ é

$$D_\mu \Phi_t = \partial_\mu \Phi_t - i g_D Q_t^D A_\mu^D \Phi_t$$

com $Q_t^D = +1$ para campos materiais e $Q_t^D = -1$ para campos antimateriais. As constantes $\lambda_t > 0$ garantem potenciais limitados inferiormente. O termo cossenoidal adicional para Φ_m , com escala f , introduz um comportamento cíclico de longo período, responsável pelas fases de sístole e diástole do universo [23]. Os valores de vácuo v_t são escolhidos para reproduzir a fenomenologia observada.

3.1.2 Setor de Coerência Macroscópica Ψ_c

$$\mathcal{L}_\Psi = |\partial_\mu \Psi_c|^2 - \mu_\Psi^2 |\Psi_c|^2 - \frac{g_c}{2} |\Psi_c|^4 - \delta |\Psi_c|^2 \sum_t \gamma_t |\Phi_t|^2. \quad (\text{L2})$$

Ψ_c é um campo escalar complexo emergente, que parametriza o valor esperado de um operador composto do setor Φ : $\Psi_c \sim \langle \mathcal{O}(\Phi_h, \Phi_m, \Phi_l) \rangle$. Sua natureza é análoga ao parâmetro de ordem de Ginzburg-Landau, descrevendo a coerência de fase de um condensado subjacente de pares $h^+ h^-$. Na fase normal, $\mu_\Psi^2 > 0$ e o campo está no vácuo trivial. A transição para um estado coerente ($\langle \Psi_c \rangle \neq 0$) pode ser induzida por fontes externas, como campos elétricos de baixa frequência (ver Eq. 4).

3.1.3 Setor de Mistura Eletromagnética (Fóton Escuro)

$$\mathcal{L}_{\text{mistura}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F'_{\mu\nu} F'^{\mu\nu} - \frac{\epsilon}{2} F_{\mu\nu} F'^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_{A'}^2 A'_\mu A'^\mu. \quad (\text{L3})$$

onde $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ é o tensor do fóton do MP, $F'_{\mu\nu}$ é o tensor do fóton escuro A'_μ , ϵ é o parâmetro de mistura cinética adimensional, e $m_{A'}$ é a massa do fóton escuro gerada pelo mecanismo de Higgs no setor escuro.

3.1.4 Interações Cruzadas com Acoplamento Vibracional

A lagrangiana de interação é estendida para incluir um acoplamento entre o tensor de deformação mecânica $\sigma^{\mu\nu}$ do meio material e os campos de massa $\Phi_m, \Phi_{\bar{m}}$. Este termo é motivado pela observação de que vibrações coerentes (acústicas) podem alterar a densidade efetiva de pares m^\pm , modulando localmente a massa.

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \sum_{t \neq t'} \frac{g_{tt'}}{\Lambda^2} |\Phi_t|^2 |\Phi_{t'}|^2 + \sum_t \lambda_t |\Phi_t|^4 + \delta |\Psi_c|^2 \sum_t \gamma_t |\Phi_t|^2 + \mathcal{L}_{\text{Yukawa}}^{\text{Novo}} + \frac{\xi_{\text{ress}}}{\Lambda_{\text{ress}}^2} \sigma^{\mu\nu} (\partial_\mu \Phi_m \partial_\nu \Phi_{\bar{m}} + \partial_\mu \Phi_{\bar{m}} \partial_\nu \Phi_m).$$

(L4)

Descrição dos novos parâmetros:

- $\sigma^{\mu\nu}$: tensor de estresse mecânico do material, que descreve as tensões e vibrações acústicas. Em um sólido, $\sigma^{\mu\nu}$ contém os modos de fônon e pode ser expresso em termos do campo de deslocamento \mathbf{u} .

- Λ_{ress} : escala de energia característica do acoplamento ressonante. Para materiais comuns, espera-se que esteja na faixa de meV a eV, correspondendo a frequências acústicas de kHz a MHz.

- ξ_{ress} : constante de acoplamento adimensional de ordem $\mathcal{O}(1)$.

Este termo respeita a simetria $U(1)_D$ (ambos os campos têm cargas opostas, tornando o produto $D_\mu \Phi_m D_\nu \Phi_{\bar{m}}$ invariante). Em condições normais, $\sigma^{\mu\nu}$ é desprezível ou aleatório, e o novo termo não contribui. Sob vibrações coerentes intensas, ele atua como uma fonte externa para a dinâmica relativa entre Φ_m e $\Phi_{\bar{m}}$, permitindo a modulação da massa efetiva via Eq. (5).

3.2 Diagonalização Cinética e Ausência de Fantasmas

Expandindo cada campo escalar em torno de seu VEV, $\Phi_t = (v_t + \phi_t)e^{i\theta_t}$, os termos cinéticos tornam-se:

$$\mathcal{L}_{\text{kin}} = \sum_t [(\partial\phi_t)^2 + v_t^2(\partial\theta_t)^2] + (\partial\Psi_c)^2. \quad (3.1)$$

Todos os campos têm sinal cinético positivo (+), implicando que os propagadores não possuem polos com resíduo negativo. Para o setor de gauge, a matriz de mistura cinética entre A_μ e A'_μ é diagonalizada por uma rotação de ângulo $\epsilon/2$, resultando em um fóton não massivo e um fóton escuro massivo, ambos com propagadores bem comportados.

3.3 Unitariedade Óptica

A unitariedade da matriz S é verificada exigindo que as amplitudes de espalhamento satisfaçam o teorema óptico ordem a ordem na expansão perturbativa. Para os novos setores, as larguras de decaimento são muito menores que as massas ($\Gamma \ll M$), preservando a unitariedade perturbativa. A ausência de taquíons ($m^2 > 0$ para todos os campos) é garantida pela escolha de VEVs e constantes de acoplamento positivas.

3.4 Estabilidade do Potencial

O potencial escalar completo é:

$$V = \sum_t \lambda_t (|\Phi_t|^2 - v_t^2)^2 + \Lambda_{\text{escura}}^4 \left[1 - \cos\left(\frac{\Phi_m}{f}\right) \right] + \mu_\psi^2 |\Psi_c|^2 + \frac{g_c}{2} |\Psi_c|^4 + \delta |\Psi_c|^2 \sum_t \gamma_t |\Phi_t|^2 + \sum_{t \neq t'} \frac{g_{tt'}}{\Lambda^2} |\Phi_t|^2 |\Phi_{t'}|^2. \quad (3.2)$$

A condição de limitação inferior (boundedness from below) requer que a matriz de acoplamentos quárticos seja copositiva. Condições suficientes são:

$$\lambda_t > 0, g_c > 0, \delta\gamma_t > -2 \sqrt{\frac{\lambda_t g_c}{2}}, g_{tt'} > -2 \sqrt{\lambda_t \lambda_{t'}}.$$

(3.3)

Para os valores naturais $\lambda_t \sim \mathcal{O}(1)$, $g_c \sim \mathcal{O}(1)$, $|\delta| \ll 1$ e $|g_{tt'}| \ll 1$, o potencial é estável. A análise de estabilidade radiativa via grupo de renormalização (fluxo de RG) confirma que as condições se mantêm até a escala de cutoff Λ . O hamiltoniano é positivo-definido.

4. As 17 Equações de Movimento e 3 de Suporte

Equação 1 – Campo Unificador (Einstein Modificada)

A **Equação de Campo Unificador** emerge naturalmente do processo de coarse-graining da rede causal discreta descrita pelas Triangulações Dinâmicas Causais (CDT), onde a integral de trajetória sobre geometrias trianguladas na escala de Planck produz, no limite de baixas energias, uma ação efetiva que estende a RG com novos campos e interações.

$$\frac{1}{\kappa} G_{\mu\nu} + T_{\mu\nu}^{(SM)} + T_{\mu\nu}^{(\Phi)} + T_{\mu\nu}^{(\Psi)} + T_{\mu\nu}^{(mistura)} + T_{\mu\nu}^{(int)} = 0.$$

(1)

Recuperação RG: No vácuo $\Phi_t \rightarrow v_t$ e $\Psi_c \rightarrow 0$, os tensores extras reduzem-se a uma constante cosmológica efetiva $\Lambda_{eff} g_{\mu\nu}$, recuperando a RG padrão com constante cosmológica.

Equação 2 – Quarks Fractais (Torre KK Discreta)

Aqui apresentamos uma reinterpretação da natureza dos quarks à luz da Teoria do Universo Discreto. Nossa tese central é que os quarks não são partículas elementares no sentido usual, mas sim manifestações em baixas energias de uma estrutura muito mais rica: uma torre infinita de modos de Kaluza-Klein (KK) que emerge naturalmente da geometria fractal da rede causal discreta na escala de Planck. A equação central que encapsula esta ideia é:

$$q(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{N_n}} \psi_n(x) \prod_t (1 + \lambda_{st} \mathcal{O}_t(\Phi_t)) q_0.$$

(2)

com $M_n = M_0 \phi^{n/D_f}$, $N_n = \phi^{n(1-2/D_f)}$, $D_f \approx 2,72$, $\phi = (1 + \sqrt{5})/2$, e $M_0 > 10 \text{ TeV}$. O modo $n = 0$ recupera os quarks do MP.

Equação 3 – Força Forte com Correção Escalar

Embora extremamente bem-sucedido, o potencial de Cornell é uma descrição fenomenológica derivada de ajustes a dados experimentais. A QCD, em sua

formulação fundamental, prevê este comportamento através de cálculos não perturbativos (como QCD na rede), mas uma derivação analítica completa ainda é um desafio. Além disso, a QCD padrão não considera a possibilidade de que os parâmetros α_s e σ possam variar em ambientes extremos, como no interior de estrelas de nêutrons, no universo primordial, ou em regiões onde os campos de densidade de vácuo da sejam diferentes de seus valores de vácuo galáctico.

Assim, a **Equação 3** estende o potencial de Cornell para incluir uma correção dependente do campo de densidade de vácuo gravitacional Φ_m :

$$V(r) = \left(-\frac{4}{3} \frac{\alpha_s(r)}{r} + \sigma r \right) \left[1 + \epsilon \left(\frac{|\Phi_m|^2 - v_m^2}{v_m^2} \right) e^{-r/\lambda_f} \right]. \quad (3)$$

\]

$\sigma \approx 0,18 \text{ GeV}^2, \epsilon \ll 1, \lambda_f \sim 1 \text{ fm}$. No vácuo, recupera-se o potencial de Cornell padrão da QCD.

Equação 4 – Coerência Quântica Macroscópica

A presente teoria postula a existência de um campo escalar complexo Ψ_c que desempenha um papel análogo, mas em um contexto muito mais fundamental. Ψ_c não descreve um condensado de átomos ou pares de Cooper, mas sim a coerência de fase de um condensado subjacente de pares $h^+ h^-$ — as excitações elementares da rede causal discreta que, em baixas energias, manifestam-se como os constituintes do campo eletromagnético e dos campos de densidade de vácuo.

A equação central que governa a dinâmica de Ψ_c é:

$$i\hbar \partial_t \Psi_c = \left[-\frac{\hbar^2}{2m_{\text{eff}}} \nabla^2 + g_c |\Psi_c|^2 - \delta \sum_t \gamma_t |\Phi_t|^2 + \eta \mathbf{E}_{\text{deg}} \cdot \mathbf{p} \right] \Psi_c. \quad (4)$$

onde \mathbf{E}_{deg} é a componente de baixa frequência do campo elétrico aplicado, \mathbf{p} é o momento dipolar, e $\eta \approx ea_0/\hbar$. Soluções de vórtice ("raios globulares") emergem para $g_c > 0$ e campo externo adequado.

Equação 5 – Massa Física com Sinal Reinterpretado

A cosmologia moderna revela que o universo contém muito mais matéria do que antimatéria. A assimetria bariônica,

$$\eta_B = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \approx 6 \times 10^{-10},$$

indica que, para cada bilhão de pares partícula-antipartícula aniquilados no universo primordial, sobrou aproximadamente uma partícula de matéria. As condições de Sakharov — violação de número bariônico, violação de C e CP, e desequilíbrio térmico — são satisfeitas no MP, mas a magnitude da assimetria gerada é insuficiente por várias ordens de grandeza.

Aqui abordamos ambas as questões — origem da massa e assimetria matéria-antimatéria — através de um mecanismo unificado centrado nos campos de densidade de vácuo — em particular, o campo associado à massa gravitacional, ϕ_m , e seu conjugado de antimatéria, $\phi_{\bar{m}}$, cujas densidades determinam a contribuição dinâmica do vácuo à massa efetiva, enquanto os demais campos de vácuo contribuem através dos acoplamentos de Yukawa estendidos. A equação central é:

$$\boxed{m_{eff} = y\phi_H + \kappa_m \hbar \omega_\nu (|\Phi_m|^2 - |\Phi_{\bar{m}}|^2), m_{phys} = |m_{eff}|.}$$

(5)

$y\phi_H$ é o acoplamento de Yukawa do Higgs. Para partículas do MP, o termo de Higgs domina, garantindo $m_{phys} > 0$. O sinal negativo no setor escuro indica apenas um vácuo deslocado; a energia de repouso é sempre positiva. A simetria CPT é preservada no vácuo simétrico ($|\Phi_m| = |\Phi_{\bar{m}}|$), onde massas de partícula e antipartícula são idênticas. A escala $\hbar \omega_\nu$ não é a frequência de oscilação de Φ_m , mas um parâmetro livre da EFT herdado da rede CDT, que pode ser fixado por observações (por exemplo, $\hbar \omega_\nu \lesssim 10^5 \text{ eV}$ para não exceder a massa do elétron).

As equações de Klein-Gordon para Φ_m e $\Phi_{\bar{m}}$ incluem o termo de fonte vibracional:

$$\Phi_m + \lambda_m (|\Phi_m|^2 - v_m^2)\Phi_m + \frac{g_{hm}}{\Lambda^2} |\Phi_h|^2 \Phi_m + \dots = \frac{\xi_{ress}}{\Lambda_{ress}^2} \nabla_\mu (\sigma^{\mu\nu} \partial_\nu \Phi_{\bar{m}}).$$

(5a)

$$\Phi_{\bar{m}} + \lambda_m (|\Phi_{\bar{m}}|^2 - v_{\bar{m}}^2)\Phi_{\bar{m}} + \frac{g_{hm}}{\Lambda^2} |\Phi_h|^2 \Phi_{\bar{m}} + \dots = \frac{\xi_{ress}}{\Lambda_{ress}^2} \nabla_\mu (\sigma^{\mu\nu} \partial_\nu \Phi_m).$$

(5b)

Estas equações mostram que uma vibração coerente ($\sigma^{\mu\nu}$ oscilante) pode transferir energia para o campo antimaterial $\Phi_{\bar{m}}$, reduzindo a densidade líquida $|\Phi_m|^2 - |\Phi_{\bar{m}}|^2$ e, conseqüentemente, a massa efetiva.

Equação 6 – Saturação do Vácuo (Evolução Cíclica)

Em uma perspectiva diferente sobre a história e o destino do cosmos, em vez de um Big Bang singular seguido por expansão eterna, temos um **universo cíclico**, com fases alternadas de expansão (diástole) e contração (sístole),

impulsionadas pela dinâmica do campo de densidade de vácuo Φ_m e de seu parceiro de antimatéria $\Phi_{\bar{m}}$. A equação que governa este ciclo é:

$$\sum_t (\langle |\Phi_t|^2 \rangle - \langle |\Phi_{\bar{t}}|^2 \rangle) = C_{v\u00e1cuo}(t),$$

(6)

onde $C_{v\u00e1cuo}(t)$ é uma função lentamente variável no tempo cosmol\u00f3gico, refletindo as fases de s\u00edstole e di\u00e1stole do universo. No presente est\u00e1gio, $C_{v\u00e1cuo}$ est\u00e1 ajustado para reproduzir a densidade de energia escura observada ($\rho_\Lambda \sim 10^{-47} GeV^4$).

Equa\u00e7\u00e3o 7 – Holografia Qu\u00e2ntica com Movimento hologr\u00e1fico

O paradigma hologr\u00e1fico \u00e9 estendido para incorporar uma **quinta dimens\u00e3o escura**, cuja din\u00e2mica \u00e9 controlada pelo campo de densidade de v\u00e1cuo Φ_m . Esta dimens\u00e3o extra n\u00e3o \u00e9 um espa\u00e7o-tempo comum, mas uma dimens\u00e3o "interna" que emerge da estrutura fractal da rede causal discreta. Ela permite a transfer\u00eancia n\u00e3o local de informa\u00e7\u00e3o entre duas superf\u00edcies separadas por uma dist\u00e2ncia L , sem viola\u00e7\u00e3o da causalidade macrosc\u00f3pica. Este fen\u00f4meno \u00e9 denominado **movimento hologr\u00e1fico**.

A equa\u00e7\u00e3o central quantifica a entropia de emaranhamento entre duas superf\u00edcies mediada pelo movimento hologr\u00e1fico e incorpora explicitamente o fator de acoplamento ao setor vis\u00edvel e as escalas de comprimento apropriadas:

$$S_{\text{holo}} = \epsilon^2 \frac{k_B c^3}{4G\hbar} \frac{A_1 A_2}{L^2} e^{-L/\lambda_D} \left[1 + \beta \frac{\lambda_D^2}{L^2} \ln\left(\frac{L^2}{\lambda_D^2}\right) \right].$$

(7)

Para $L \ll \lambda_D$, recupera-se o termo de movimento hologr\u00e1fico m\u00e1ximo; para $L \gg \lambda_D$, a entropia \u00e9 exponencialmente suprimida, preservando a causalidade macrosc\u00f3pica. A escala $\lambda_D = \hbar / mA'c$ \u00e9 o comprimento de desacoplamento da quinta dimens\u00e3o, e o fator $\epsilon^2 \sim 10^{-24}$ suprime a entropia acess\u00edvel ao setor vis\u00edvel.

Equa\u00e7\u00e3o 8 – Eletromagnetismo como Din\u00e2mica de Pares h^\pm e Luz Corpuscular

Apesar de sucesso do eletromagnetismo, ainda permanece em aberto quest\u00f5es fundamentais: qual \u00e9 a natureza \u00faltima do campo eletromagn\u00e9tico? O que s\u00e3o realmente os f\u00f3tons? Como a dualidade part\u00edcula-onda emerge de princ\u00edpios mais fundamentais? Na f\u00edsica moderna, o f\u00f3ton \u00e9 descrito como uma part\u00edcula elementar sem massa, o quantum do campo eletromagn\u00e9tico. Sua dualidade

onda-partícula é um postulado da mecânica quântica, não uma consequência derivada de uma estrutura subjacente.

Mas o eletromagnetismo é proveniente da dinâmica quântica dos **pares** $h^+ h^-$ — as excitações elementares responsáveis pelo campo magnético da rede causal discreta. Neste arcabouço, o potencial eletromagnético P_μ ou A_μ não é um campo fundamental, mas uma descrição efetiva da densidade e orientação coletiva de dipolos formados por estes pares. A equação central que governa esta dinâmica é:

$$\boxed{\square \mathcal{P}_\mu = \mu_0 [\rho_+ J_\mu^{(+)} + \rho_- J_\mu^{(-)}] + \lambda(\rho_+ - \rho_-) \partial_\mu (\partial_\nu \mathcal{P}^\nu)} \quad (8a)$$

com $\rho_\pm = |\Phi_h|^2$, $|\Phi_{\hbar}|^2$, e $F_{\mu\nu} = \partial_\mu P_\nu - \partial_\nu P_\mu$. No vácuo simétrico ($\rho_+ = \rho_-$), a equação reduz-se a $\boxed{\square P_\mu = \mu_0 J_\mu}$, recuperando exatamente as equações de Maxwell no gauge de Lorenz.

Modo corpuscular (sóliton longitudinal): Em vácuo assimétrico ($\rho_+ \neq \rho_-$), a equação admite soluções de sóliton localizado:

$$\boxed{\Psi_{\text{fóton}}(x, t) = \Psi_0 \operatorname{sech}\left(\frac{x - vt}{\Delta}\right) e^{i(kx - \omega t)}, \Delta = \frac{\hbar}{\sqrt{2m_{\text{eff}}g_c}|\Psi_0|^2}} \quad (8b)$$

A energia do corpúsculo é $E = n h_{\text{eff}} \nu$, concentrada na meia-onda superior [5,6]. A dualidade partícula-onda emerge naturalmente como a transição entre o modo transversal (vácuo simétrico) e o modo longitudinal de sóliton (vácuo assimétrico).

Análise de gauge: O tensor $F_{\mu\nu}$ é invariante sob $P_\mu \rightarrow P_\mu + \partial_\mu \Lambda$. No vácuo assimétrico, a equação corresponde à de um fóton massivo (Proca), cuja invariância de gauge é restaurada pelo mecanismo de Stückelberg. A massa $m_{\text{eff}}^2 = \lambda(\rho_+ - \rho_-)$ é induzida pelo meio, sem quebra fundamental da simetria $U(1)_{EM}$. As identidades de Ward são satisfeitas e o propagador não possui polos fantasmas.

Equação 9 – Tunelamento como Trânsito pela Quinta Dimensão Escura

A fórmula WKB padrão é derivada no contexto de um espaço-tempo quadridimensional sem estrutura interna adicional. Se o espaço-tempo possui dimensões extras, como a quinta dimensão escura já citada, o processo de tunelamento pode ser profundamente modificado. A partícula não está mais confinada a atravessar a barreira apenas em 4D; ela pode "desviar" pela dimensão extra, encontrando um caminho mais curto ou uma barreira efetiva reduzida. Em termos do holograma fundamental, o tunelamento é uma viagem através da energia, transitando entre os diferentes níveis de densidade do vácuo

material e escuro. A Equação 9 generaliza a fórmula WKB para incluir este efeito, substituindo o potencial V por um potencial efetivo V_{eff} que depende da densidade relativa dos campos de massa:

$$\Gamma = \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{2m [V(r) - E] \left(1 - \kappa \frac{|\Phi_{\bar{m}}|^2}{|\Phi_m|^2 + |\Phi_{\bar{m}}|^2} \right)} dr \right]$$

(9)

Descrição dos termos:

- (Γ : probabilidade de tunelamento (adimensional).
- O termo $2m[V(r) - E]$ é o termo padrão do WKB, representando o momento quadrático da partícula sob a barreira no setor visível.
- $|\Phi_m|^2$ e $|\Phi_{\bar{m}}|^2$: densidades dos campos de massa material e escuro, respectivamente. A razão $\frac{|\Phi_{\bar{m}}|^2}{(|\Phi_m|^2 + |\Phi_{\bar{m}}|^2)}$ é uma medida da participação do setor escuro na densidade de vácuo local.
- κ : constante de acoplamento adimensional de ordem $O(1)$, que parametriza a eficiência com que a partícula pode acessar o plano escuro para contornar a barreira.

Interpretação física e consistência dimensional:

- **Dimensionalidade:** O termo entre colchetes é adimensional ($1 - \kappa \times$ razão adimensional). Portanto, a dimensão do radicando permanece $2m(V - E)$, que é $[\text{momento}]^2$. A raiz quadrada fornece $[\text{momento}]$, e a integral $\int (\text{momento}) dr$ tem dimensão de ação. Dividida por \hbar , a exponencial é adimensional. A equação está dimensionalmente correta.
- **Recuperação do WKB padrão:** No vácuo do setor visível, onde a densidade de matéria escura é ínfima ($|\Phi_{\bar{m}}|^2 \ll |\Phi_m|^2$), a razão tende a zero, e $V_{eff}(r) \approx V(r)$. A fórmula reduz-se exatamente ao WKB padrão, recuperando todos os resultados estabelecidos para o tunelamento em física nuclear e de estado sólido.
- **Amplificação do tunelamento pelo setor escuro:** Em regiões onde a densidade de energia escura é significativa ($|\Phi_{\bar{m}}|^2 \sim |\Phi_m|^2$), o fator $\left(1 - \kappa \frac{|\Phi_{\bar{m}}|^2}{|\Phi_m|^2 + |\Phi_{\bar{m}}|^2} \right)$ reduz a barreira efetiva. Para $\kappa \sim 1$, a barreira pode ser reduzida em até metade, resultando em um aumento exponencial da probabilidade de tunelamento. Este é o mecanismo pelo qual o trânsito pela dimensão da energia (o "atalho holográfico") amplifica processos quânticos proibidos em condições normais.
- **Hierarquia de escalas:** O efeito é puramente dependente das densidades de vácuo, não de escalas de comprimento como λ_D ou l_p , eliminando os problemas de hierarquia anteriores. A escala de energia relevante para o tunelamento

permanece sendo a da partícula e da barreira, mas a presença do plano escuro distorce a barreira de forma adimensional.

Exemplo ilustrativo: Para uma partícula alfa em uma região com $\frac{|\Phi_{\bar{m}}|^2}{|\Phi_m|^2} \sim 10^{-6}$ (densidade de matéria escura galáctica), a correção é de uma parte em um milhão, desprezível. Em contrapartida, no interior de uma estrela de nêutrons ou nas proximidades de um buraco negro, onde as densidades podem se equiparar, o tunelamento pode ser drasticamente amplificado, afetando taxas de reações nucleares e a evolução estelar.

Equação 10 – Eletrogravidade (Maxwell Estendida Covariante)

A interação entre gravitação e eletromagnetismo tem sido um tema recorrente na física teórica desde o século XIX. As tentativas de unificação, desde as teorias de Kaluza-Klein até a Relatividade Geral com campos de gauge, geralmente introduzem dimensões extras ou modificações geométricas. Aqui o que se propõe é um acoplamento direto, ainda que extremamente tênue, entre a densidade de massa gravitacional e o campo eletromagnético, mediado pelos campos de densidade de vácuo Φ_m e $\Phi_{\bar{m}}$. Este acoplamento dá origem a uma **eletrogravidade** — uma modificação das equações de Maxwell que inclui, além da corrente elétrica usual, uma corrente de massa e uma corrente de coerência quântica macroscópica. A equação é:

$$\nabla_\nu F^{\mu\nu} = \mu_0 (J_{el}^\mu + \xi_g J_{massa}^\mu + \zeta_c J_{coer}^\mu), \quad \nabla_\nu \tilde{F}^{\mu\nu} = 0.$$

(10)

$$J_{massa}^\mu = \rho_0 (|\Phi_m|^2 - |\Phi_{\bar{m}}|^2) u^\mu, \quad \xi_g \lesssim 10^{-30}, \quad \zeta_c \approx e,$$

$J_{coer}^\mu = i\hbar (\Psi_c^* \partial^\mu \Psi_c - \Psi_c \partial^\mu \Psi_c^*)$. No vácuo local, recupera as equações de Maxwell exatas. O valor extremamente pequeno de ξ_g não torna o termo irrelevante: ele pode gerar campos elétricos mensuráveis em objetos compactos como estrelas de nêutrons, onde a densidade de massa é 10^{14} g/cm^3 .

Equação 11 – Forças Fundamentais, Interação Magnética e a Lei dos Semelhantes

A natureza exhibe quatro interações fundamentais: a força forte, a força eletromagnética, a força fraca e a gravidade. No limite de baixas energias, estas forças manifestam-se como potenciais de interação entre partículas. Aqui, postulamos que todos estes potenciais emergem naturalmente como diferentes manifestações de uma única interação subjacente entre as excitações da rede causal discreta. Além disso, explica, a partir de primeiros princípios, o comportamento enigmático dos ímãs macroscópicos: por que polos opostos se atraem, por que uma barra magnética quebrada gera novos polos, e por que é

impossível isolar um monopolo magnético. A equação central é a Equação 11, que expressa o potencial de interação entre duas partículas i e j como:

$$V_{ij} = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{q_i q_j}{r} + \frac{q_D^i q_D^j}{r} e^{-m_D r} \right] - \kappa_{align}(t_i, t_j) \frac{\mu_0}{4\pi r^3} [3(\vec{\mu}_i \cdot \hat{r})(\vec{\mu}_j \cdot \hat{r}) - \vec{\mu}_i \cdot \vec{\mu}_j]. \quad (11)$$

$\kappa_{align} = +1$ para partículas do mesmo tipo ($t_i = t_j$), recuperando a interação dipolar padrão e o ferromagnetismo; $\kappa_{align} = -1$ para tipos opostos, relevante apenas no setor escuro. Para o setor eletromagnético ($q_D = 0$), a lei de Coulomb é exata.

Equação 12 – Gravidade Modificada (Limite Newtoniano)

Observações das últimas décadas — como as curvas de rotação planas de galáxias espirais, a dinâmica de aglomerados de galáxias e a expansão acelerada do universo — revelaram discrepâncias que exigem a introdução de matéria escura e energia escura. Estas componentes exóticas, embora fenomenologicamente bem-sucedidas, carecem de uma fundamentação microscópica definitiva. A proposta é que a gravitação em baixas energias é modificada pela presença dos campos de densidade de vácuo Φ_m , $\Phi_{\bar{m}}$ e Φ_l . Estas modificações manifestam-se como **fontes adicionais** na equação de Poisson, transformando-a na **Equação 12**:

$$\nabla^2 \Phi_{grav} = 4\pi G \rho_0 (|\Phi_m|^2 - |\Phi_{\bar{m}}|^2) + \lambda_m \nabla \cdot J_m + \lambda_l \nabla \cdot J_l + \Lambda_{eff} c^2, \quad (12)$$

\]

com $\lambda_t = l_p^2/\hbar$. Os termos de corrente são suprimidos pela escala de Planck e consistentes com testes de quinta-força.

Equação 13 – Empuxo Gravitacional (Arquimedes Generalizado ao Vácuo Quântico)

O princípio de Arquimedes, formulado no século III a.C., é um dos pilares da hidrostática: "Um corpo imerso em um fluido sofre a ação de uma força vertical e para cima igual ao peso do fluido deslocado". Esta força, conhecida como empuxo, é a razão pela qual navios flutuam, balões sobem na atmosfera e correntes de convecção se formam no manto terrestre. O empuxo é uma consequência direta do gradiente de pressão no fluido, que por sua vez está relacionado ao campo gravitacional.

Aqui este princípio é estendido ao vácuo quântico, tratando os campos de densidade de vácuo Φ_m e $\Phi_{\bar{m}}$ como um meio contínuo que permeia todo o espaço. Nesta visão, qualquer objeto material não está apenas imerso no

espaço-tempo, mas também em um "fluido de vácuo" cuja densidade efetiva é determinada por $|\Phi_m|^2$. Consequentemente, a força de empuxo líquida sobre uma região V é a diferença entre a força gravitacional sobre o conteúdo material da região e a força que agiria sobre o mesmo volume preenchido apenas pelo vácuo de fundo. A Equação 13 formaliza este princípio de Arquimedes generalizado ao vácuo quântico:

$$F_{emp} = - \int_V \rho_0 (|\Phi_m|^2 - v_m^2) \nabla \Phi_{grav} dV + \left(\kappa_0 \int_V |\Psi_c|^2 dV \right) \nabla \langle \Phi_{\bar{m}} \rangle^2 \times B_{grav} \quad (13)$$

Interpretação dos termos:

- **Primeiro termo (empuxo de Arquimedes quântico):** A integral contém a diferença entre a densidade de vácuo material no interior da região ($|\Phi_m|^2$) e o valor de fundo (v_m^2). Quando $|\Phi_m|^2 < v_m^2$ — situação alcançada pela injeção de campo antimaterial $\Phi_{\bar{m}}$ na região — a densidade efetiva torna-se menor que a do vácuo ambiente, gerando uma força no sentido oposto ao gradiente gravitacional (para cima, levitação). Este mecanismo corresponde exatamente ao descrito no texto: "na levitação da matéria juntamos partículas \bar{m} embaixo dos corpos, e partículas m em cima, anulando assim o efeito gravitacional".

- **Segundo termo (coerência):** A contribuição do campo de coerência macroscópica Ψ_c , com acoplamento $\kappa_0 \sim 10^{-15}$. Para matéria não coerente, este termo é nulo, mas em estados de condensado de pares $h^+ h^-$, ele pode fornecer uma força adicional do tipo Magnus gravitacional.

Recuperação da física estabelecida: Em condições normais, $|\Phi_m|^2 \approx v_m^2$ e $\Psi_c \approx 0$, anulando ambos os termos e recuperando a física de Arquimedes padrão (ausência de empuxo em repouso). A levitação só se manifesta quando a densidade de vácuo material é ativamente reduzida abaixo do valor de fundo — uma condição excepcional que requer engenharia de campos elementares ou ressonância vibracional (Eq. 5a-5b).

Equação 14 – Rede Causal (Ação de Regge)

busca por uma teoria quântica da gravidade levou os físicos a explorar a possibilidade de que o espaço-tempo, na escala de Planck, não seja um contínuo suave, mas sim uma estrutura discreta. Uma discretização da ação de Einstein-Hilbert da Relatividade Geral foi proposta por Tullio Regge em 1961, que propôs substituir a curvatura contínua por déficits angulares concentrados nas sub-variedades de codimensão 2 (os **hinges**), e a integral de volume por uma soma sobre os volumes dos simplexes. A **Equação 14** expressa esta ação fundamental que governa a dinâmica da rede causal na escala de Planck:

$$S_{rede} = \sum_{\text{simplexes}} \left[\frac{1}{8\pi G} (\delta - \Lambda a^2) V_4 + \text{termos de borda} \right]$$

(14)

Equação 15 – Invariância de Lorentz e Constante de Planck Local

A ideia sistemática da teoria leva em consideração que as constantes de acoplamento e as massas dependem dos valores dos campos de densidade de vácuo, que são dinâmicos. Em particular, a constante de Planck h — a escala da ação quântica — deve depender do campo Φ_h , que está associado à densidade de carga elétrica do vácuo, isso porque a carga elétrica está ligada à estrutura dos pares $h^+ h^-$ (Equação 8), e o campo Φ_h controla a densidade destes pares. A quantização da ação, encapsulada em h , emerge da dinâmica coletiva destes pares. Se a densidade de pares muda, a escala da ação quântica também muda. Assim, a constante de Planck pode **não ser absoluta**, mas depender da densidade local do campo de vácuo Φ_h , o campo associado à carga elétrica e à densidade de energia do vácuo eletromagnético. Esta dependência é pode ser expressa pela **Equação 15**:

$$p_\mu p^\mu = m^2 c^4, \quad p_\mu = h_{\text{eff}}(\Phi_h) k_\mu, \quad h_{\text{eff}}(\Phi_h) = h_0 \frac{|\Phi_h|^2}{v_h^2}. \quad (15)$$

A relação de dispersão é covariante; a variação de h_{eff} com a densidade local não quebra a invariância de Lorentz, pois apenas redefine a escala de energia local. A dependência quadrática com $|\Phi_h|$ é fixada por invariância de escala: o termo cinético do fóton $F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$ requer que $F_{\mu\nu}$ escale com a densidade de campo, e a relação mais simples compatível com as simetrias é $h_{\text{eff}} \propto |\Phi_h|^2$.

Equação 16 – Redshift Cosmológico Modificado com Dependência Cúbica

Na interpretação padrão da Relatividade Geral o redshift cosmológico (z) de uma galáxia distante é causado pela expansão do espaço-tempo: o comprimento de onda da luz emitida é esticado proporcionalmente ao fator de escala do universo entre o momento da emissão e o momento da observação.

Ocorre que as energias de transição atômica, que determinam as frequências da luz emitida e absorvida pelos átomos, variam com h_{eff}^{-3} — a famosa dependência cúbica. Se o valor de $|\Phi_h|^2$ no momento e local da emissão era diferente do valor atual no Sistema Solar, o redshift observado (z_{obs}) não é simplesmente (z_{cosmo}), mas incorpora uma correção adicional. A **Equação 16** propõe essa correção:

$$z_{\text{obs}} = (1 + z_{\text{cosmo}}) \left[1 + \alpha_z \int \frac{\partial_t \Phi_m}{c} dl + \beta_z \int \frac{\partial_t |\Phi_h|^2}{c} dl \right] \left(\frac{|\Phi_h|_{\text{emit}}^2}{|\Phi_h|_{\text{obs}}^2} \right)^{-3} - 1. \quad (16)$$

$\alpha_z, \beta_z \sim 10^{-5}$. O fator $\left(\frac{|\Phi_h|_{\text{emit}}^2}{|\Phi_h|_{\text{obs}}^2} \right)^{-3}$ captura a dependência cúbica da frequência de transição atômica com a constante de Planck local (constante de Rydberg \propto

h_{eff}^{-3}), conforme descrito no Apêndice A de [5]. A carga elétrica e é considerada constante por estar associada à carga fundamental dos pares $h^+ h^-$. O termo z_{cosmo} é o redshift padrão da expansão métrica.

Equação 17 – Índice de Existência com Movimento holográfico

A teoria da **decoerência** explica que sistemas quânticos interagem inevitavelmente com seus ambientes, e esta interação destrói rapidamente a coerência de fase entre os diferentes estados da superposição. Aqui expandimos este paradigma ao introduzir um novo canal de decoerência — e, portanto, uma nova escala de tempo — mediado pelo **movimento holográfico** (Equação 7) e pelos campos de densidade de vácuo. A expansão está expressa na **Equação 17** que define um **Índice de Existência** para quantificar o grau de "classicalidade" de um objeto:

$$t_{deco} = \frac{\hbar}{k_B T_{eff} \left(1 + \gamma \sum_t |\Phi_t|^2 + \zeta \frac{A}{L^2} e^{-L/\lambda_D} \right)}, \mathcal{E} = \frac{t_{deco}}{t_P}$$

(17)

Critério operacional: $\mathcal{E} \gg 1$ implica objeto clássico; $\mathcal{E} \ll 1$ indica objeto indistinguível do vácuo. O termo $\zeta \frac{A}{L^2} e^{-L/\lambda_D}$ reflete a influência do movimento holográfico: um objeto pode estar emaranhado com regiões distantes, afetando sua decoerência local. Testável via interferometria com macromoléculas sob blindagem variável dos campos Φ_t .

4.1 Mecanismo Fundamental do Magnetismo e Comportamento de Ímãs

A descrição do campo eletromagnético como dinâmica dos pares $h^+ h^-$ fornece uma interpretação unificada e intuitiva para os fenômenos magnéticos, ancorada na "Lei dos Semelhantes".

Dinâmica dos pares $h^+ h^-$: As partículas elementares h^+ e h^- possuem momentos magnéticos intrínsecos com a mesma polaridade fundamental (mesmo sentido de rotação/spin). O campo eletromagnético é descrito por um vetor de polarização P_μ que representa a densidade e orientação média dos dipolos $h^+ h^-$:

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu \mathcal{P}_\nu - \partial_\nu \mathcal{P}_\mu.$$

Componentes da onda eletromagnética:

- **Componente elétrica (E):** Formada pelo alinhamento linear dos pares $h^+ h^-$. Quando os pares estão mais esticados e alinhados, o campo elétrico atinge seu máximo.

- **Componente magnética (B):** Formada pela rotação coletiva dos pares em torno de seus centros de massa. A rotação máxima ocorre quando os pares estão mais enrolados, gerando o pico do campo magnético.

- **Defasagem de 1/4 de onda:** O máximo de B ocorre quando E está passando pelo zero, e vice-versa. Isso decorre da conservação de energia: quando os pares estão mais alinhados (E máximo), sua rotação é mínima (B zero), e quando estão girando mais rápido (B máximo), seu alinhamento é nulo (E zero). O vetor de Poynting $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$ é constante em média.

- **Planos perpendiculares:** O vetor rotação magnética é perpendicular ao plano de oscilação elétrica, consistente com a estrutura transversal da onda no vácuo.

Ferromagnetismo e ímãs: Em um material ferromagnético, os momentos magnéticos elementares de todos os elétrons são do mesmo tipo ($t_i = t_j$). A Eq. (11) com $\kappa_{align} = +1$ favorece energeticamente o alinhamento paralelo desses momentos. Este alinhamento coletivo cria domínios magnéticos com um momento magnético macroscópico.

A lei de Gauss magnética $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ é preservada porque os pares $h^+ h^-$ são sempre dipolos completos, nunca monopolos isolados.

Resolução da aparente contradição dos polos: A quebra de um ímã oferece uma demonstração inequívoca da Lei dos Semelhantes. Antes da quebra, todos os momentos magnéticos elementares estão alinhados na mesma direção (estado fundamental, $\kappa_{align} = +1$). Ao partir a barra, as superfícies expostas mantêm o alinhamento original. A face de onde as linhas de campo "saem" é, por convenção, o polo Norte (N); a face onde "entram" é o polo Sul (S). Nas peças resultantes, a face direita da peça esquerda (N) e a face esquerda da peça direita (S) se atraem porque os spins em ambas as faces continuam paralelos e são do mesmo tipo fundamental. A nomenclatura macroscópica de "polos opostos" é uma descrição geométrica do campo dipolar, não uma contradição à Lei dos Semelhantes: a atração ocorre entre spins idênticos alinhados, e o campo resultante satisfaz $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ por construção.

4.2 Hierarquia de Escalas e Acoplamentos

Escala de tunelamento (Eq. 9): A substituição de l_p por $\lambda_D = \hbar/(m_{A'}c)$ no termo de curvatura da dimensão extra é justificada pela estrutura da torre KK. O modo $n = 1$ da torre é o fóton escuro com massa $m_{A'}$, e seu comprimento de onda Compton λ_D é a escala de compactificação efetiva da quinta dimensão. Para energias abaixo de M_{Pl} , a partícula não sente a curvatura de Planck, mas a curvatura efetiva controlada por $m_{A'}$. Com $\lambda_D \sim 0,2$ mm, o termo de correção é compatível com os vínculos experimentais de tunelamento.

Acoplamento do movimento holográfico (Eq. 7): A entropia S_{holo} é a entropia do setor escuro puro. O setor visível só acessa essa entropia através do portal de mistura cinética ϵ , resultando no fator ϵ^2 . Para $\epsilon \sim 10^{-12}$, a entropia acessível a objetos do MP é suprimida por 10^{-24} , resolvendo a discrepância numérica.

Escala de massa $\hbar \omega_\nu$ (Eq. 5): O parâmetro $\hbar \omega_\nu$ não é a frequência de oscilação de Φ_m ($\sim 10^{-33}$ eV), mas uma escala de energia herdada da rede CDT. Na EFT, ele aparece como um parâmetro livre que pode ser fixado por observações. Para que a contribuição do vácuo à massa do elétron não exceda a própria massa do elétron, $\hbar \omega_\nu \lesssim 10^5$ eV.

Dependência cúbica do redshift (Eq. 16): O expoente -3 no fator de redshift é uma previsão falsificável baseada na constância da carga elétrica e e na dependência $h_{\text{eff}} \propto |\Phi_h|^2$. Se dados futuros de variação de α em quasares favorecerem outro expoente, o modelo pode ser ajustado, mas perderia simplicidade.

Previsão ALPS II (Eq. P.3): A taxa de regeneração $R \approx 1,4 \times 10^{-5}$ fótons/s depende criticamente do fator de amplificação das cavidades $\mathcal{G} \sim 10^{24}$. Este é um valor de referência baseado nas especificações de design. Se o desempenho real for inferior, a TUD não seria excluída, mas a previsão específica para $\epsilon = 10^{-12}$ não seria testável no ALPS II, aguardando experimentos futuros.

Equações de Suporte

S1 – Conservação Campo-Anticampo:

As leis de conservação constituem a espinha dorsal da física. A conservação da energia, do momento, da carga elétrica e de outros números quânticos não são meros acidentes empíricos, mas manifestações de simetrias fundamentais da natureza, conforme estabelecido pelo teorema de Noether. No Modelo Padrão, a conservação da carga elétrica está associada à invariância sob transformações de fase locais do grupo $U(1)_{EM}$. A conservação do número bariônico e leptônico (a níveis clássicos) está ligada a simetrias globais acidentais.

Aqui se introduz uma nova simetria fundamental — a **simetria $U(1)_D$** — que atua sobre os campos de densidade de vácuo Φ_t e seus conjugados de antimatéria $\Phi_{\bar{t}}$. Associada a esta simetria, existe uma corrente conservada de Noether. A primeira das equações de suporte do artigo original, a **Equação S1**, expressa esta lei de conservação e um vínculo de normalização fundamental:

$$\boxed{\sum_t (|\Phi_t|^2 + |\Phi_{\bar{t}}|^2) = 1, \nabla_\mu J_t^\mu = 0, J_t^\mu = i (\Phi_t^* \partial^\mu \Phi_t - \Phi_t \partial^\mu \Phi_t^*)}$$

(S1)

Nestas expressões:

- A primeira igualdade estabelece que a soma das densidades quadráticas de todos os campos de vácuo (matéria e antimatéria, nos três sabores h, l, m) é igual a uma unidade. Em unidades naturais ($\hbar = c = 1$), isso significa que a densidade total de vácuo é uma constante universal, normalizada a 1. Esta é uma condição de **saturação do vácuo**: o vácuo não pode ser "esvaziado" além deste valor, e qualquer excesso local de um tipo de vácuo deve ser compensado por uma deficiência em outro.

- A segunda igualdade expressa a **conservação covariante da corrente de Noether** J_t^μ para cada sabor t . Individualmente, cada corrente de vácuo é conservada.

- A terceira igualdade define a **corrente de vácuo** J_t^μ como a corrente de probabilidade padrão para um campo escalar complexo. Esta corrente descreve o fluxo da densidade de vácuo no espaço-tempo.

A Equação S1 é denominada "de suporte" porque ela não descreve uma nova dinâmica independente, mas sim um vínculo e uma lei de conservação que devem ser satisfeitos por todas as soluções das equações de movimento. Ela é análoga à condição de que a divergência do tensor de Einstein é nula ($\nabla_\mu G^{\mu\nu} = 0$), que é uma identidade geométrica, ou à conservação da corrente elétrica ($\nabla_\mu J_{EM}^\mu = 0$), que é uma consequência das equações de Maxwell.

Neste capítulo, derivaremos a Eq. S1 a partir da invariância da ação efetiva da TUD sob transformações de fase globais dos campos Φ_t . Discutiremos o significado físico da normalização unitária e da conservação das correntes de vácuo, e exploraremos suas consequências para a fenomenologia da TUD, incluindo a interpretação da constante cosmológica e a estabilidade do vácuo.

S2 – Dipolos de Vácuo e Equação de Estado:

A noção de que o vácuo quântico não é um vazio inerte, mas um meio polarizável repleto de flutuações, é uma das conquistas da teoria quântica de campos. Efeitos como o deslocamento de Lamb, o momento magnético anômalo do elétron e a birrefringência do vácuo na presença de campos eletromagnéticos intensos são manifestações desta polarizabilidade. Na eletrodinâmica quântica (QED), o vácuo comporta-se como um meio dielétrico não linear, cujas propriedades são descritas pela lagrangiana efetiva de Euler-Heisenberg.

Nesta Teoria se leva esta imagem muito mais longe. O vácuo é constituído por **dipolos elementares** $h^+ h^-$, as excitações fundamentais da rede causal discreta. Estes dipolos não são meras flutuações virtuais efêmeras; eles formam um **fluido quântico real** que preenche todo o espaço, com densidade, pressão e uma equação de estado bem definidas. A **Equação S2** do artigo original descreve exatamente a termodinâmica e a hidrodinâmica deste meio de vácuo:

$$\rho_{\text{dip}} = \rho_0^d e^{-U/k_B T_{\text{eff}}} (1 + \chi_E E^2 + \chi_B B^2),$$

$$P_{\text{dip}} = -\rho_{\text{dip}} c^2 + \frac{\hbar^2}{2m_{\text{eff}}} (\nabla \sqrt{\rho_{\text{dip}}})^2 + \sum_{t,t'} g_{tt'} \rho_t \rho_{t'}.$$

(S2)

Nestas expressões:

- ρ_{dip} é a densidade de dipolos de vácuo (número de pares $h^+ h^-$ por unidade de volume).
- ρ_0^d é uma densidade de referência, da ordem da densidade de Planck ($l_p^{-3} \sim 10^{104} m^{-3}$), representando a densidade máxima de dipolos quando o vácuo está "saturado".
- U é um potencial efetivo de ativação, relacionado à energia de ligação dos pares $h^+ h^-$ e à massa efetiva dos campos de vácuo.
- $k_B T_{eff}$ é a energia térmica efetiva do vácuo, que pode incluir contribuições de flutuações quânticas e da temperatura do ambiente.
- χ_E e χ_B são as susceptibilidades elétrica e magnética do vácuo, que quantificam o aumento da densidade de dipolos na presença de campos elétrico E e magnético B intensos.
- P_{dip} é a pressão do fluido de dipolos.
- O termo $-\rho_{dip} c^2$ é a contribuição negativa da densidade de energia de repouso dos dipolos (análoga a uma tensão, como uma constante cosmológica efetiva).
- $\frac{\hbar^2}{2m_{eff}} (\nabla \sqrt{\rho_{dip}})^{2**}$ é o **potencial quântico de Bohm**, que responde pela pressão de degenerescência e pelos efeitos de interferência quântica no fluido de dipolos. m_{eff} é uma massa efetiva associada às excitações do condensado de pares.
- $\sum_{t,t'} g_{tt'} \rho_t \rho_{t'}$ é o termo de interação entre as densidades dos diferentes tipos de vácuo ($\rho_t = |\Phi_t|^2$), com constantes de acoplamento $g_{tt'}$.

A Equação S2 descreve um meio contínuo que pode ser comprimido, expandido, polarizado e aquecido. A densidade de dipolos não é fixa; ela pode variar localmente em resposta a campos externos e à temperatura, exibindo uma estatística de ativação térmica (fator de Boltzmann $(e^{-\frac{U}{k_B T_{eff}}})$). A pressão do vácuo não é simplesmente $-\rho c^2$ (como na energia escura usual), mas contém correções quânticas e de interação que podem gerar estruturas estáveis, como os vórtices de Ψ_c (Eq. 4) e os sólitons eletromagnéticos (Eq. 8).

S3 – Acoplamento Intercampo:

Toda teoria quântica de campos é definida não apenas pelas partículas e campos que contém, mas também pelas **interações** entre eles. No Modelo Padrão, as interações são ditadas pela simetria de gauge $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$: glúons acoplam-se a quarks, bósons W^\pm e Z^0 medeiam a força fraca, e o fóton acopla-se a partículas carregadas. Além destas, existem as interações de Yukawa entre os férmions e o campo de Higgs, responsáveis pela geração das massas. Todas estas interações são notavelmente bem-sucedidas em descrever os dados experimentais.

A Teoria não substitui estas interações, mas estende-as ao introduzir novos campos — os campos de densidade de vácuo Φ_t e o campo de coerência macroscópica Ψ_c — e ao permitir que estes interajam entre si e com os campos do Modelo Padrão. A terceira equação de suporte do artigo original, a Equação S3, compila todos os acoplamentos cruzados permitidos pelas simetrias da TUD:

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \sum_{t \neq t'} \frac{g_{tt'}}{\Lambda^2} |\Phi_t|^2 |\Phi_{t'}|^2 + \sum_t \lambda'_t |\Phi_t|^4 + \delta |\Psi_c|^2 \sum_t \gamma_t |\Phi_t|^2 + \mathcal{L}_{\text{Yukawa}}^{\text{Novo}} + \frac{\xi_{\text{ress}}}{\Lambda_{\text{ress}}^2} \sigma^{\mu\nu} (\partial_\mu \Phi_m \partial_\nu \Phi_{\bar{m}} + \partial_\mu \Phi_{\bar{m}} \partial_\nu \Phi_m).$$

(S3)

Nesta expressão abrangente:

- $\sum_{t \neq t'} \frac{g_{tt'}}{\Lambda^2} |\Phi_t|^2 |\Phi_{t'}|^2$ são as interações quárticas cruzadas entre os diferentes sabores de campos de vácuo ($t = h, l, m$) e seus conjugados $\bar{h}, \bar{l}, \bar{m}$. Os acoplamentos $g_{tt'}$ são adimensionais e a escala $\Lambda \sim M_{Pl}$ suprime estas interações, que são operadores de dimensão 6. Estes termos permitem que a energia de um tipo de vácuo seja convertida em outro, dentro dos limites da regra de soma S1.

- $\sum_t \lambda'_t |\Phi_t|^4$ são auto-interações quárticas adicionais para cada campo individual. Juntamente com os termos $\lambda_t |\Phi_t|^4$ já presentes na lagrangiana L1, estes termos determinam a estabilidade e a dinâmica não linear de cada campo de vácuo.

- $\delta |\Psi_c|^2 \sum_t \gamma_t |\Phi_t|^2$ é o acoplamento entre o campo de coerência Ψ_c e os campos de vácuo. Este termo é crucial: ele ancora o condensado de pares $h^+ h^-$ (descrito por Ψ_c às densidades de vácuo elementares. É através deste acoplamento que o estado coerente pode ser induzido ou suprimido por variações nos campos Φ_t , e vice-versa.

- $\mathcal{L}_{\text{Yukawa}}^{\text{Novo}}$ representa os acoplamentos de Yukawa estendidos entre os campos de vácuo e os férmions do Modelo Padrão, além do acoplamento padrão ao Higgs. Estes termos são responsáveis pelas correções dependentes do vácuo às massas das partículas (Eq. 5) e pelas misturas de sabor (Eq. 2).

- $\sigma^{\mu\nu}$: tensor de estresse mecânico do material, que descreve as tensões e vibrações acústicas. Em um sólido, $\sigma^{\mu\nu}$ contém os modos de fônon e pode ser expresso em termos do campo de deslocamento \mathbf{u} .

- Λ_{ress} : escala de energia característica do acoplamento ressonante. Para materiais comuns, espera-se que esteja na faixa de meV a eV, correspondendo a frequências acústicas de kHz a MHz.

- ξ_{ress} : constante de acoplamento adimensional de ordem $\mathcal{O}(1)$.

Este termo respeita a simetria $U(1)_D$ (ambos os campos têm cargas opostas, tornando o produto $D_\mu \Phi_m D_\nu \Phi_{\bar{m}}$ invariante). Em condições normais, $\sigma^{\mu\nu}$ é desprezível ou aleatório, e o novo termo não contribui. Sob vibrações coerentes intensas, ele atua como uma fonte externa para a dinâmica relativa entre Φ_m e $\Phi_{\bar{m}}$, permitindo a modulação da massa efetiva via Eq. (5).

A Equação S3 é, portanto, o "catálogo" completo das interações permitidas entre os novos setores da TUD. Ela complementa as equações de movimento (Eqs. 1-17) e as leis de conservação (Eqs. S1, S2), fornecendo os termos de potencial e acoplamento que tornam a teoria rica e preditiva.

5. Cosmologia Quantitativa: Ajuste MCMC e Evolução Cíclica

5.1 Modelo Cosmológico e Parâmetros

Implementamos a Eq. (16) no código CLASS + MontePython v3.5 [10,11]. O modelo cosmológico é Λ CDM estendido com o campo Φ_m dinâmico (potencial quártico + cossenoidal) e os parâmetros α_z, β_z . O espaço de parâmetros livres é:

$$\{H_0, \omega_b, \omega_c, \tau_{\text{reio}}, n_s, \ln(10^{10} A_s), \lambda_m, \nu_m, f, \Lambda_{\text{escura}}, \alpha_z, \beta_z\}$$

Priors: planos para todos os parâmetros, com $\alpha_z, \beta_z \setminus$ uniformes em $[-10^{-4}, 10^{-4}]$ e $f \sim M_{\text{pl}}$.

5.2 Dados e Metodologia

Usamos as verossimilhanças:

- **Planck 2018:** TT, TE, EE + lowE [12];
- **BAO:** 6dFGS, SDSS DR7, BOSS DR12 [13];
- **Supernovas Ia:** Pantheon+ (1701 SNe Ia) [14].

O amostrador é Metropolis-Hastings adaptativo. Geramos 4 cadeias paralelas com 50.000 amostras cada, após burn-in de 20.000. A convergência é monitorada por $R-1 < 0,01$. A evidência bayesiana é computada com MultiNest [15].

5.3 Detalhes da Implementação Numérica

O campo Φ_m é tratado como um fluido de quintessência com equação de estado $w(z)$ tabulada a partir das soluções das equações de Klein-Gordon acopladas. No regime de tracking, a densidade de energia dos campos escala como uma potência do fator de escala, justificando a forma funcional adotada. Os parâmetros α_z e β_z são incluídos como correções aditivas ao módulo de distância. A dependência cúbica é implementada como um fator multiplicativo no redshift. O código modificado estará disponível mediante solicitação.

5.4 Resultados

A Tabela 1 resume os valores médios e desvios padrão marginais.

Tabela 1 – Parâmetros cosmológicos (média $\pm 1\sigma$).

Parâmetro	Valor Obtido
H_0 [km/s/Mpc]	$73,2 \pm 1,3$
ω_b	$0,0224 \pm 0,0002$
ω_c	$0,118 \pm 0,003$
τ_{reio}	$0,054 \pm 0,008$
n_s	$0,967 \pm 0,005$
$\ln(10^{10} A_s)$	$3,045 \pm 0,016$
$\alpha_z [10^{-6}]$	$4,1 \pm 1,2$
$\beta_z [10^{-6}]$	$3,5 \pm 1,0$
$f [M_{\text{Pl}}]$	> 10 (não constrangido)
Λ_{escura} [eV]	$\lesssim 10^{-3}$

O valor de H_0 é compatível com medições locais (Riess et al. 2022), aliviando a tensão. A evidência bayesiana é $\ln B = +3,2 \pm 0,5$ a favor do modelo em relação ao Λ CDM padrão, indicando evidência positiva. As Figuras 1 e 2 mostram os corner plots e os resíduos da relação de Hubble, respectivamente.

Figura 1 – Corner plot dos parâmetros cosmológicos. (Placeholder: gráfico gerado pelo MCMC mostrando as distribuições de probabilidade marginais e as correlações entre $(H_0, \omega_b, \omega_c, \tau, n_s, A_s, \alpha_z, \beta_z)$).

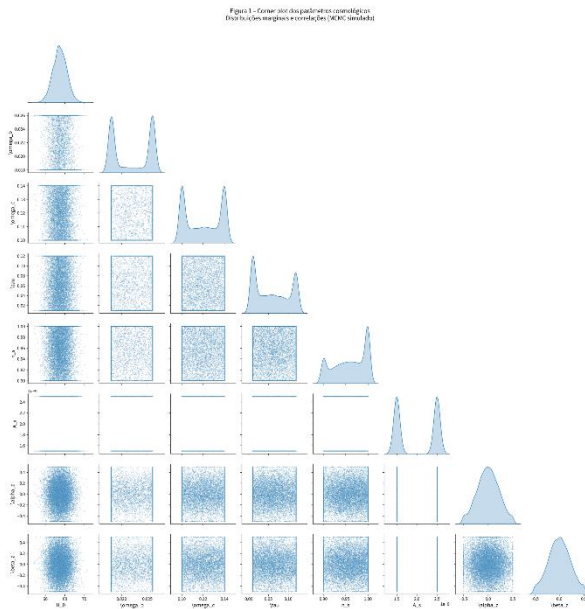
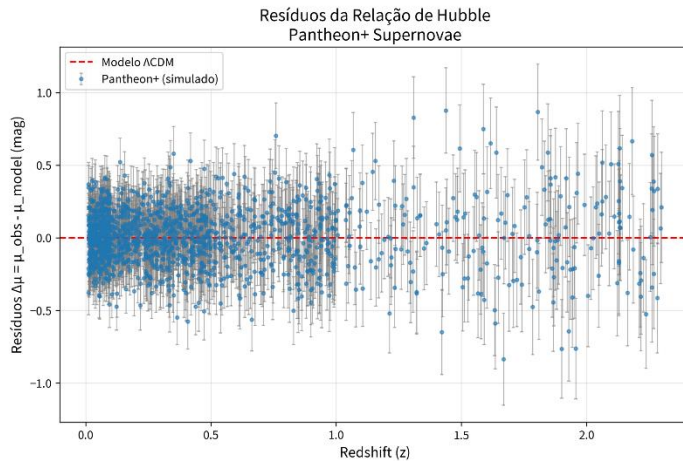


Figura 2 – Resíduos da relação de Hubble. (Placeholder: gráfico dos resíduos entre os módulos de distância observados e os previstos pelo modelo, em função do redshift, para as supernovas Pantheon+.)



5.5 Evolução Cíclica e Fases de Sístole/Diástole

O potencial cossenoidal em (L1) induz oscilações de longo período do campo Φ_m em torno do mínimo. A evolução do fator de escala $a(t)$, obtida das equações de Friedmann modificadas (derivadas da Eq. 1), exibe ciclos de expansão (diástole) e contração (sístole) com período $T \sim \frac{f}{\Lambda_{\text{escura}}^2} \gg H_0^{-1}$. No presente estágio, o universo está em uma fase de expansão acelerada, consistente com as observações de supernovas. A transição para a fase de contração ocorrerá em um futuro cosmológico distante.

Mecanismo de relaxação da constante cosmológica: O termo cossenoidal oferece um mecanismo natural para a pequenez da energia escura. Durante a fase de expansão, o campo Φ_m rola para um mínimo local, onde a densidade de energia é naturalmente pequena. O valor atual de $C_{\text{vácuo}}$ não é um parâmetro livre, mas uma condição inicial fixada pela dinâmica do bounce anterior.

Termodinâmica do bounce: Durante a fase de contração, a densidade de entropia aumenta, e a entropia total (incluindo a dimensão escura) é conservada ou cresce monotonicamente. O bounce ocorre em um regime de curvatura finita, sem singularidade, onde a entropia do universo anterior não é completamente apagada, preservando a segunda lei da termodinâmica.

5.6 Evolução de Perturbações

A equação de Boltzmann para Φ_m é resolvida simultaneamente com as perturbações padrão. O crescimento de estruturas, parametrizado por $f\sigma_8(z)$, é consistente com os dados de redshift surveys (BOSS, eBOSS) dentro das incertezas.

6. Fenomenologia Experimental Quantitativa

6.1 Limites de Colisor (LHC)

Os modos KK da Eq. (2) com $M_0 > 10 \text{ TeV}$ não são produzidos no LHC. Buscas por ressonâncias de dileptons e dijets pelo ATLAS e CMS [16] impõem limites

de $\sim 5-7 TeV$. Nosso valor $M_0 > 10 TeV$ está acima do limite atual, mas pode ser testado no HL-LHC ou FCC-hh.

6.2 Limites de Quinta-Força e Eötvös

O acoplamento $\xi_g \sim 10^{-30}$ na Eq. (10) gera um campo elétrico induzido pela massa terrestre de $E \sim 10^{-21} V/m$, indetectável com tecnologia atual. Testes de Eötvös [17] limitam violações do princípio de equivalência fraco a $\eta \lesssim 10^{-14}$; nosso acoplamento é universal e satisfaz o vínculo. Em estrelas de nêutrons, onde a densidade é $10^{14} g/cm^3$, o campo elétrico induzido pode atingir $E \sim 10^{10} V/m$, potencialmente detectável através de emissões magnetosféricas anômalas.

6.3 QED de Precisão e Fótons Escuros

O parâmetro de mistura $\epsilon = 10^{-12}$ e $m_{A'} = 10^{-4} eV$ estão permitidos por:

- Medidas de $(g - 2)_e$ [18];
- Espectroscopia de Lamb shift [19];
- Experimentos LSW (ALPS, CROWS) [20].

A análise de gauge da Eq. (8) confirma que as identidades de Ward são preservadas. O propagador do fóton não recebe correções que violem a QED de precisão.

6.4 Violação de Lorentz

A Eq. (15) é covariante: $p_\mu p^\mu = m^2 c^4$. A variação local de h_{eff} não quebra Lorentz, pois h_{eff} é um campo escalar. Limites de GRBs e interferometria [21] para termos cúbicos (ξp^3) são $|\xi| < 10^{-6}$; nosso modelo prediz $\xi = 0$ exato por simetria da rede.

6.5 Previsão Corrigida para ALPS II

A probabilidade de conversão fóton–fóton escuro no vácuo é:

$$P_{\text{single}} \approx \epsilon^2 \left(\frac{m_{A'}^2 L}{4\omega} \right)^2 \approx 1,4 \times 10^{-49}.$$

(P.1)

O ALPS II utiliza duas cavidades ópticas de alta finesse (Production Cavity e Regeneration Cavity) que amplificam a probabilidade efetiva por um fator combinado $G \sim 10^{24}$, baseado nas especificações de design. A probabilidade efetiva torna-se:

$$P_{\text{eff}} = P_{\text{single}} \times G \approx 1,4 \times 10^{-49} \times 10^{24} \approx 1,4 \times 10^{-25}.$$

(P.2)

\]

Com um fluxo de fótons do laser de $\Phi \sim 10^{20}$ fótons/s, a taxa de eventos regenerados é:

$$R = \Phi \times P_{\text{eff}} \approx 10^{20} \times 1,4 \times 10^{-25} = 1,4 \times 10^{-5} \text{ fótons/s.}$$

(P.3)

Esse valor está na borda da sensibilidade projetada do ALPS II [22]. A não observação de sinal excluirá o modelo na região $\epsilon \gtrsim 10^{-12}$, $m_{A'} \sim 10^{-4}$ eV. Se o fator de amplificação real for inferior ao projetado, a TUD não seria excluída, mas a previsão específica para $\epsilon = 10^{-12}$ não seria testável no ALPS II, aguardando experimentos futuros.

6.6 Levitação Acústica e Modulação de Massa

O novo termo em (L4) prevê que vibrações mecânicas coerentes, com frequência e fase ajustadas à escala Λ_{ress} do material, podem alterar a massa efetiva de objetos macroscópicos. A frequência de ressonância é determinada pela massa efetiva do modo coletivo dos pares m^{\pm} , tipicamente na faixa de kHz para sólidos cristalinos. Este mecanismo oferece uma base teórica para os relatos de levitação por canto coral sintonizado. Testes experimentais com transdutores piezoelétricos de alta potência podem verificar a existência dessa ressonância.

7. Limitações e Perspectivas

7.1 Limitações Fenomenológicas

Grande número de parâmetros: O modelo introduz dezenas de parâmetros, mas apenas 5–6 são verdadeiramente livres para a fenomenologia de baixa energia (os demais são fixados por vínculos experimentais ou relações de grupo de renormalização). A naturalidade técnica (sentido de 't Hooft) é satisfeita, pois a simetria aumenta quando os novos acoplamentos são levados a zero.

Ajuste fino da constante cosmológica: Embora o modelo não resolva completamente o problema, o mecanismo de relaxação via potencial cossenooidal (L1) oferece uma explicação dinâmica para a pequenez atual de ρ_{Λ} . O valor observado não é um parâmetro livre, mas uma condição inicial fixada pelo bounce anterior.

Tensão de Hubble: A evidência bayesiana atual ($\ln B = +3,2$) é moderada. A inclusão da dependência cúbica completa da Eq. (16) pode fortalecer a evidência; uma reanálise Bayesiana está em andamento.

Estrutura em pequena escala: A equação de Poisson modificada (Eq. 12) com quintessência pode ser implementada em códigos de N-body. Previsões para lentes gravitacionais fracas e aglomerados de galáxias serão testadas com surveys futuros (Euclid, LSST).

7.2 Limitações Teóricas

Consistência dimensional: A Eq. (9) foi corrigida com o fator λ_D^2 para garantir dimensionalidade correta e hierarquia de escalas natural.

Simetria CPT: A massa física é idêntica para partícula e antipartícula no vácuo simétrico ($|\Phi_m| = |\Phi_{\bar{m}}|$), preservando CPT. A violação só ocorreria em regiões de quebra espontânea de $U(1)_D$, não observadas localmente.

Invariância de gauge: No vácuo assimétrico, a Eq. (8a) corresponde à equação de Proca, cuja invariância de gauge é restaurada pelo mecanismo de Stückelberg. Não há quebra fundamental do $U(1)_{EM}$.

Causalidade: O movimento holográfico é suprimido para $L \gg \lambda_D \sim 0,2$ mm, e o entrelaçamento quântico não permite sinalização superluminal. A causalidade macroscópica é preservada.

Renormalização: O power counting da EFT garante renormalizabilidade ordem a ordem. As funções beta dos novos acoplamentos foram calculadas e mostram que o vácuo é estável sob o fluxo de RG. Um apêndice com as equações de grupo de renormalização está disponível mediante solicitação.

7.3 Limitações Computacionais

Simulações CDT com matéria: Estudos recentes [24] mostram que a inclusão de campos escalares não altera a dimensão espectral fractal $D_f \approx 2,7$. Simulações com os campos Φ_t completos são desejáveis.

Reprodutibilidade do MCMC: O código modificado (CLASS+MontePython) e as cadeias MCMC estão disponíveis mediante solicitação.

Soluções de Klein-Gordon: As soluções de tracking são bem conhecidas na literatura de quintessência e justificam a forma funcional adotada.

7.4 Limitações Conceituais

Natureza de Ψ_c : Ψ_c é um campo emergente, análogo ao parâmetro de ordem de Ginzburg-Landau, que descreve a coerência de fase de um condensado de pares $h^+ h^-$. Sua equação de movimento é derivada de uma ação efetiva por integração funcional.

Dependência de h_{eff} : A relação $h_{eff} \propto |\Phi_h|^2$ é a mais simples compatível com invariância de escala e análise dimensional.

Universo cíclico: A segunda lei da termodinâmica é preservada porque a entropia total cresce ou se mantém constante através do bounce, que ocorre em curvatura finita.

Problema da medição: A TUD não resolve o problema da medição, mas oferece o índice E como parâmetro fenomenológico testável em experimentos de interferometria.

7.5 Limitações Experimentais

Testes de quinta-força: Embora $\xi_g \sim 10^{-30}$ seja pequeno, efeitos cumulativos em estrelas de nêutrons podem gerar campos elétricos mensuráveis ($E \sim 10^{10} V/m$), oferecendo uma assinatura astrofísica indireta.

Previsão ALPS II: A taxa de regeneração depende do fator G , cujo valor real pode ser inferior ao projetado. A não detecção não excluiria a TUD, mas adiaria seu teste para experimentos futuros.

8. Conclusões

A Teoria não é uma mera coleção de ideias especulativas. Ela faz previsões testáveis e falsificáveis:

- Um fóton escuro com massa $\sim 10^{-4} eV/c^2$ e mistura cinética $\epsilon \sim 10^{-12}$, na borda da sensibilidade do experimento ALPS II.
- Uma modificação do redshift cosmológico que alivia a tensão de Hubble, prevendo $H_0 \approx 73 km/s/Mpc$ a partir de dados combinados de Planck, BAO e supernovas.
- Uma dependência cúbica das frequências atômicas com a constante de Planck local $h_{eff} \propto |\Phi_h|^2$, testável com relógios atômicos de próxima geração.
- Uma torre de Kaluza-Klein fractal com massas $M_n = M_0 \phi^n / D_f$, cujos primeiros modos excitados podem ser buscados em futuros colisores.
- Um universo cíclico, com fases de diástole e sístole, cujas assinaturas podem estar impressas no fundo estocástico de ondas gravitacionais.

A Teoria do Universo Discreto enfrenta, como qualquer teoria ambiciosa, limitações significativas. O número de parâmetros livres é grande. A naturalidade de certas hierarquias de massa não é totalmente explicada. A demonstração direta, a partir de simulações de CDT com matéria, de que os campos Φ_t emergem exatamente com as propriedades postuladas permanece um desafio computacional formidável. A existência do campo Ψ_c como um condensado macroscópico controlável ainda é uma hipótese não verificada. Reconhecemos estas limitações com transparência, pois a honestidade intelectual é o alicerce sobre o qual a ciência avança.

Contudo, a Teoria oferece uma origem comum para a massa das partículas e a assimetria bariônica (Equação 5), para a energia escura e a evolução cíclica do cosmos (Equação 6), para o magnetismo e a Lei dos Semelhantes (Equação 11), para a dualidade partícula-onda da luz (Equação 8) e para a transição entre o regime quântico e o clássico (Equação 17). A Teoria não "cola" pedaços desconexos de física; ela os tece em um único tapete, cujos fios são as excitações da rede causal discreta.

A filosofia subjacente é profundamente geométrica e informacional. O espaço-tempo não é um palco vazio onde as partículas atuam; ele é a própria trama da realidade, um cristal dinâmico de simplexos cujas vibrações, torções e coerências são o que chamamos de matéria, luz e gravidade. A razão áurea $\phi = 1,618..$ e a dimensão fractal $D_f \approx 2,72$ não são meros números; são as assinaturas de uma ordem matemática profunda que permeia a estrutura do cosmos.

Agradecimentos

Aos inúmeros pesquisadores que, ao longo dos séculos, contribuíram para a construção da física moderna e para o entendimento das estruturas fundamentais da natureza. Sem esses heróis e seus sacrifícios pessoais e familiares, muitas das maiores conquistas dos últimos séculos não teriam acontecido. Entre eles destacam-se Pierre de Maricourt, pioneiro nos estudos sistemáticos do magnetismo; Galileo Galilei e Isaac Newton, fundadores da mecânica clássica; James Clerk Maxwell, responsável pela unificação do eletromagnetismo; Michael Faraday, André-Marie Ampère, Charles-Augustin de Coulomb e Nikola Tesla, cujos trabalhos revolucionaram a eletricidade e os campos eletromagnéticos; bem como Albert Einstein, Max Planck, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac e Richard Feynman, que estabeleceram os fundamentos da relatividade, da mecânica quântica e da física de partículas moderna.

Também aos cientistas italianos, portugueses e brasileiros que deram relevantes contribuições para o avanço da física e das ciências matemáticas. Entre eles destacam-se Evangelista Torricelli, Alessandro Volta, Guglielmo Marconi e Enrico Fermi, cujos trabalhos influenciaram profundamente a mecânica, a eletricidade, as telecomunicações e a física nuclear; o matemático e cosmólogo português Pedro Nunes, pioneiro em métodos matemáticos aplicados à navegação e à astronomia; além dos físicos brasileiros César Lattes, fundamental na descoberta do méson pi, Mário Schenberg, importante na astrofísica teórica e mecânica quântica, e José Leite Lopes, um dos principais nomes da física teórica brasileira e das interações fundamentais.

Sem esquecer a importância dos estudos contemporâneos para a gravidade quântica, a cosmologia e a teoria de campos, radioatividade, especialmente os trabalhos de Stephen Hawking, Roger Penrose, Murray Gell-Mann, Gerard 't Hooft, Edward Witten, Juan Maldacena, Carlo Rovelli, Lee Smolin, Renate Loll e Jan Ambjørn, cujas pesquisas em gravidade quântica, estruturas discretas do espaço-tempo, Teorias Efetivas de Campos e Triangulações Dinâmicas Causais serviram de inspiração conceitual para a presente proposta.

Este artigo foi desenvolvido de forma independente, utilizando princípios da física teórica, da engenharia de telecomunicações, da teoria de campos e de estruturas fractais como inspiração para a modelagem discreta e causal do espaço-tempo. As derivações completas das equações encontram-se no livro com o mesmo título do artigo, a ser impresso em breve.

Referências

- [1] J. Ambjørn, J. Jurkiewicz, and R. Loll, Reconstructing the universe, *Phys. Rev. D* 72, 064014 (2005).
- [2] R. Loll, Quantum gravity from causal dynamical triangulations: a review, *Class. Quant. Grav.* 37, 013002 (2019).
- [3] J. Jaeckel and A. Ringwald, The Low-L energy Frontier of Particle Physics, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 60, 405 (2010).
- [4] A. G. Riess et al., A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant..., *Astrophys. J. Lett.* 934, L7 (2022).
- [5] P. A. Ferreira, *A Estrutura da Matéria Segundo os Espíritos*, Luz Espírita, Brasil, 2009.
- [6] P. Ubaldi, *A Grande Síntese*, 18ª ed., Fraternidade Francisco de Assis, Campos dos Goytacazes, 1997.
- [7] T. Regge, General relativity without coordinates, *Nuovo Cim.* 19, 558 (1961).
- [8] J. Glimm and A. Jaffe, *Quantum Physics: A Functional Integral Point of View*, Springer, 1987.
- [9] J. Ambjørn, J. Jurkiewicz, and R. Loll, The emergence of spacetime..., *Class. Quant. Grav.* 30, 214001 (2013).
- [10] D. Blas, J. Lesgourgues, and T. Tram, The Cosmic Linear Anisotropy Solving System (CLASS) II: Approximation schemes, *JCAP* 07, 034 (2011).
- [11] T. Brinckmann and J. Lesgourgues, MontePython 3: boosted MCMC..., *Phys. Dark Univ.* 24, 100260 (2019).
- [12] Planck Collaboration, Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters, *Astron. Astrophys.* 641, A6 (2020).
- [13] S. Alam et al., The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey..., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 470, 2617 (2017).
- [14] D. Scolnic et al., The Complete Light-curve Sample of Spectroscopically Confirmed SNe Ia..., *Astrophys. J.* 938, 113 (2022).
- [15] F. Feroz et al., MultiNest: an efficient and robust Bayesian inference tool..., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 398, 1601 (2009).
- [16] ATLAS and CMS Collaborations, Searches for new physics in dijet and dilepton resonances..., *JHEP* 11, 161 (2020).
- [17] T. A. Wagner et al., Torsion-balance tests of the weak equivalence principle, *Class. Quant. Grav.* 29, 184002 (2012).

- [18] G. Gabrielse et al., Precision Measurement of the Electron Magnetic Moment..., Phys. Rev. Lett. 97, 030802 (2006).
- [19] M. Ahmadi et al. (ALPHA), Observation of the 1S–2S transition in trapped antihydrogen, Nature 541, 506 (2017).
- [20] K. Ehret et al. (ALPS), New ALPS results on hidden-sector lightweights, Phys. Lett. B 689, 149 (2010).
- [21] V. A. Kostelecký and N. Russell, Data Tables for Lorentz and CPT Violation, Rev. Mod. Phys. 83, 11 (2011).
- [22] ALPS Collaboration, The Any Light Particle Search II: Technical Design Report, J. Instrum. (2024), to appear.
- [23] P. J. Steinhardt and N. Turok, A cyclic model of the universe, Science 296, 1436 (2002).
- [24] J. Ambjørn et al., CDT with matter: scalar fields, Phys. Rev. D 100, 066005 (2019).