

Singularidades Observáveis e Evidências para uma Estrutura de Universo Dual

Uma Abordagem Geométrica para Fenômenos Quântico-Gravitacionais

Begnomar S. Porto

Pesquisador Independente

ORCID: 0009-0002-6109-7443

Rio Claro, Brasil

begnomar@begnomar.pro

Versão 3.1 - Revisão Técnica

2 de novembro de 2025

Publicação original: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17507750>

Resumo

Propomos uma estrutura teórica para unificar fenômenos aparentemente desconexos – emaranhamento quântico, paradoxo da informação em buracos negros, energia escura e estruturas cósmicas primordiais observadas pelo JWST – postulando a existência de um setor dual ao espaço-tempo observável, denotado por Σ^- . Este setor não é um universo paralelo arbitrário, mas um complemento geometricamente conjugado acoplado ao nosso universo (Σ^+) por meio de uma estrutura de dimensão superior.

Teses Centrais:

1. O emaranhamento quântico corresponde a conexões geométricas cuja "garganta" reside em Σ^-
2. A informação que entra em buracos negros transita para Σ^- , preservando a unitariedade global
3. A singularidade inicial do Big Bang pode ser reinterpretada como uma transição dimensional $\Sigma^- \rightarrow \Sigma^+$
4. As galáxias primordiais observadas pelo JWST carregam assinaturas da estrutura geométrica pré-transicional
5. A energia escura reflete o acoplamento cosmológico com Σ^-

A conjectura é testável por meio de: interferometria quântica em campos gravitacionais, efeito Casimir dinâmico, assinaturas na CMB, ecos de ondas gravitacionais e cosmologia observational de precisão.

Palavras-chave: gravidade quântica, geometria dual, correspondência ER=EPR, informação de buraco negro, energia escura, universo primordial

PACS: 04.60.-m, 04.70.Dy, 95.36.+x, 98.80.-k

Sumário

1 Introdução e Motivação	3
1.1 Problemas Abertos na Física Fundamental	3
1.2 Nossa Abordagem	4
2 Estrutura Conceitual	4
2.1 Postulado de Geometria Dual	4
2.1.1 Propriedades dos Setores	4
2.2 Acoplamento Interfacial	5
2.3 Correspondência ER=EPR Estendida	6
2.3.1 Mecanismo Proposto	6
2.4 Cosmologia Dual e o Big Bang	6
3 Resposta a Anomalias Observacionais	8
3.1 Paradoxo da Informação do Buraco Negro	8
3.2 Zero Absoluto e Temperaturas Negativas	8
3.3 Galáxias Primordiais do JWST	9
3.4 Energia Escura como Acoplamento Cosmológico	10
4 Formalização Matemática	11
4.1 Quadros Candidatos	11
4.1.1 Gravidade Bimétrica Estendida	11
4.1.2 Teoria de Gauge com Simetria Quebrada	11
4.1.3 Holografia Generalizada	11
4.2 Ação Efetiva Proposta	11
4.2.1 Especificação Detalhada	11
4.3 Equações de Movimento e Consistência	12
4.4 Modelo de Brinquedo: Buraco Negro BTZ Dual	13
5 Previsões Experimentais e Testabilidade	14
5.1 Assinaturas Laboratoriais (5-10 anos)	14
5.1.1 Teste 1: Decoerência do Emaranhamento em Campos Gravitacionais	14

5.1.2	Teste 2: Anomalias do Efeito Casimir Dinâmico	14
5.1.3	Teste 3: Flutuações Quânticas em Temperaturas Ultrabaixas	15
5.2	Assinaturas Cosmológicas (Médio Prazo)	15
5.2.1	Teste 4: Correlações Anômalas no CMB	15
5.2.2	Teste 5: Evolução da Equação de Estado da Energia Escura	16
5.3	Observações Astrofísicas	16
5.3.1	Teste 6: Ecos de Ondas Gravitacionais	16
5.3.2	Teste 7: Assimetrias de Lente Gravitacional	17
6	Relação com Teorias Estabelecidas	17
6.1	Compatibilidade e Distinções	17
6.2	Limites de Correspondência	18
7	Questões Abertas e Agenda de Pesquisa	18
7.1	Desafios Teóricos Imediatos	18
7.2	Programa Experimental Proposto	19
7.3	Oportunidades de Colaboração	19
8	Discussão e Implicações Filosóficas	20
8.1	Posição Epistemológica	20
8.2	Contexto Histórico	20
8.3	Impacto Potencial	20
9	Conclusão	21
9.1	Chamado para Colaboração	22
9.2	Reflexão Final	22
10	Agradecimentos	22
A	Análise Dimensional das Constantes de Acoplamento	22
B	Termodinâmica do Buraco Negro BTZ	23
C	Estimativas Numéricas para Experimentos	23
C.1	Decoerência do Emaranhamento (Teste 1)	23
C.2	Círculos do CMB (Teste 4)	24

1 Introdução e Motivação

1.1 Problemas Abertos na Física Fundamental

A física contemporânea enfrenta desafios profundos na interface gravidade-quântica:

Não-localidade Quântica. O emaranhamento EPR [1] viola a separabilidade local sem um mecanismo geométrico estabelecido. A correlação instantânea entre medições espacialmente separadas permanece sem interpretação causal satisfatória.

Paradoxo da Informação. A radiação de Hawking [2] sugere que buracos negros destroem informação quântica, ameaçando a unitariedade. Propostas como complementaridade [3] ou firewalls [4] não resolvem completamente a tensão entre Relatividade Geral e Mecânica Quântica.

Energia Escura. Aproximadamente 68% do conteúdo energético do universo se manifesta como pressão negativa, acelerando a expansão cósmica [5, 6]. Nenhum candidato natural existe no Modelo Padrão ou extensões conservadoras.

Estruturas Cósmicas Primordiais. O Telescópio Espacial James Webb (JWST) detectou galáxias maduras com massas estelares $M_* \sim 10^{10} M_\odot$ em redshifts $z \gtrsim 10\text{-}13$ [7, 8], desafiando escalas de tempo de formação padrão ascendente.

Conjectura ER=EPR. A proposta de Maldacena-Susskind [9] de que emaranhamento (EPR) é igual a pontes de Einstein-Rosen (ER) carece de: (a) especificação do domínio geométrico onde as pontes residem, (b) mecanismo de estabilização sem matéria exótica, (c) previsões experimentais distinguíveis.

1.2 Nossa Abordagem

Propomos uma estrutura heurística que:

1. Oferece interpretação geométrica unificada para fenômenos diversos
2. Especifica caminhos matemáticos para formalização rigorosa
3. Identifica assinaturas experimentais testáveis em múltiplas escalas
4. Reinterpreta a singularidade inicial como transição interfacial, não origem absoluta

2 Estrutura Conceitual

2.1 Postulado de Geometria Dual

Postulado 1 (Dualidade Fundamental). *O contínuo físico observável (Σ^+) está acoplado a um setor dual (Σ^-) por meio de estrutura de dimensão superior ou topologia não trivial.*

2.1.1 Propriedades dos Setores

Justificação Heurística. *Dualidades da Teoria de Cordas:* T-dualidade ($R \leftrightarrow \alpha'/R$) e S-dualidade ($g \rightarrow 1/g$) demonstram que geometria e acoplamentos não são únicos. Estendemos este princípio ao próprio espaço-tempo.

Simetria CPT: A física fundamental é invariante sob reversão simultânea de carga, paridade e tempo. Se CPT é fundamental, por que não um setor onde T (tempo) é naturalmente revertido?

Energia Negativa em QFT: Estados de energia negativa (efeito Casimir, radiação Hawking) sugerem que $\rho < 0$ é localmente permitido. Σ^- seria o regime onde isso é a norma, não exceção.

Nota Técnica sobre Causalidade. "Seta termodinâmica inversa" *não* implica violação de causalidade relativística. Especificamente:

- Em Σ^+ : Entropia cresce, processos irreversíveis seguem $t \rightarrow +\infty$
- Em Σ^- : Entropia decresce, processos "se desenrolam" seguindo $t \rightarrow -\infty$ (relativo a Σ^+)

Isto é análogo a rodar um filme para trás termodinamicamente enquanto preserva a estrutura causal local (cones de luz consistentes). Não há propagação superluminal ou loops causais fechados.

2.2 Acoplamento Interfacial

Postulado 2 (Transição Interfacial Extrema). *Em regimes de densidade, curvatura ou entropia extremas ($\rho \sim \rho_{Planck}$, $R \sim R_{Planck}$, $S \sim S_{BH}$), a interface Σ^+/Σ^- torna-se dinamicamente ativa, permitindo transições.*

Campos Mediadores. Introduzimos:

- ϕ : Campo escalar de acoplamento interfacial (análogo ao dilaton na teoria de cordas)
- G^- : Grau de liberdade gravitacional dual – não uma antipartícula, mas excitação do campo métrico $g_{\mu\nu}^-$

Condições de Ativação. A interface se torna atravessável quando:

$$|R_{\mu\nu\rho\sigma}| \sim R_{Planck} \quad \text{e/ou} \quad \left| \frac{\partial S}{\partial t} \right| \sim \frac{k_B c^5}{\hbar G}$$

Isto ocorre em:

1. Horizontes de buraco negro
2. Singularidade cosmológica inicial
3. (Especulativo) Colisões ultra-relativísticas de próxima geração

Propriedade	Σ^+ (observável)	Σ^- (dual)
Assinatura métrica	$(-, +, +, +)$	conjugada*
Seta temporal	termodinâmica \uparrow	termodinâmica \downarrow
Densidade de energia	$\rho > 0$	$\rho < 0$ (efetiva)
Gravitação	atrativa ($G^+ > 0$)	repulsiva ($G^- < 0$)

Tabela 1: Propriedades características dos setores duais. *A assinatura de $g_{\mu\nu}^-$ pode ser $(+, -, -, -)$, $(+, +, +, +)$ Euclidiana, ou estrutura topológica distinta – a ser determinada por consistência matemática (Seç. 4).

2.3 Correspondência ER=EPR Estendida

Postulado 3 (Correspondência Geométrico-Quântica Estendida). *O emaranhamento quântico entre subsistemas A e B em Σ^+ corresponde à existência de uma micro-ponte de Einstein-Rosen cuja região da "garganta" reside em Σ^- .*

2.3.1 Mecanismo Proposto

1. Criação de Par Emaranhado:

- Duas partículas A e B tornam-se emaranhadas em Σ^+
- Isto corresponde a abrir um micro-buraco de minhoca através de Σ^-
- Geometria: Σ^+ contém "bocas" da ponte; Σ^- contém "garganta"

2. Medição e Colapso:

- Medição em A (em Σ^+) propaga informação via Σ^-
- Para observadores em Σ^+ , isto aparece instantâneo
- Sem violação de causalidade: caminho não é através de Σ^+

3. Estabilização sem Matéria Exótica:

- Pontes ER em Relatividade Geral pura requerem $\rho < 0$ (matéria exótica)
- Em nossa estrutura: Σ^- naturalmente fornece $\rho^- < 0$
- "Matéria exótica" é manifestação local (em Σ^+) da geometria Σ^-

2.4 Cosmologia Dual e o Big Bang

Postulado 4 (Transição Cosmológica Primordial). *A singularidade inicial $t = 0$ é reinterpretada como transição interfacial $\Sigma^- \rightarrow \Sigma^+$, não criação ex nihilo.*

Modelo Conceitual:

1. **Pré-Big Bang:** Um ciclo anterior evolui em Σ^+ , colapsa gravitacionalmente

Aspecto	ER=EPR (Original)	Esta Conjectura
Localização da ponte	Incorporada em Σ^+	Garganta em Σ^-
Estabilização	Não especificada	Acoplamento ϕ , geometria dual
Testabilidade	Vaga	Seç. 5 (múltipla)

Tabela 2: Diferenças críticas da conjectura ER=EPR original.

2. **Transição:** Matéria ultra-densa atinge $\rho_{\text{Planck}} \rightarrow$ interface ativa \rightarrow transição para Σ^-
3. **Processamento Dual:** Em Σ^- , entropia decresce, estrutura "condensa"
4. **Re-emergência:** Condições críticas em Σ^- disparam transição $\Sigma^- \rightarrow \Sigma^+$ (Big Bang observado)
5. **Ciclo:** Universo atual eventualmente colapsa, repete

Distinção de Modelos Cílicos Padrão:

- *Steinhardt-Turok:* Colisão de branas em dimensões extras
- *Penrose (CCC):* Redimensionamento conforme no infinito futuro
- *Esta Proposta:* Dualidade geométrica com inversão termodinâmica

Vantagem Conceitual: Sem ajuste fino de condições iniciais – estrutura inicial é "herdada" de ciclo anterior via Σ^- .

Nota Técnica sobre Causalidade e Termodinâmica. "Seta termodinâmica inversa" deve ser cuidadosamente distinguida de reversão temporal. Especificamente:

- **Tempo Coordenado:** Ambos Σ^+ e Σ^- compartilham a mesma foliação temporal $t : \mathbb{R} \rightarrow$ espaço-tempo. Eventos são ordenados identicamente: $t_1 < t_2 < t_3$.
- **Seta Termodinâmica:** Em Σ^+ , entropia cresce: $dS^+/dt > 0$. Em Σ^- , entropia decresce: $dS^-/dt < 0$. Isto *não* é reversão temporal mas *reversão de processo*.
- **Estrutura Causal:** Cones de luz e ordenação causal são preservados. Não surgem curvas temporais fechadas (CTCs) ou paradoxos do avô. Uma partícula cruzando a interface em $t = t_0$ emerge em $t = t_0$ no setor dual.
- **Analogia:** Considere um filme rodando para frente (quadros 1→2→3) onde o conteúdo mostra um copo quebrado se remontando. Os *quadros* avançam (tempo), mas o *processo* reverte (termodinâmica).

Formulação Matemática:

Conservação de entropia global:

$$S_{\text{total}}(t) = S^+(t) + S^-(t) = \text{constante}$$

Quando Σ^+ aumenta desordem (e.g., formação de buraco negro), Σ^- simultaneamente aumenta ordem (condensação de informação). Ambos evoluem *para frente* em t , mas com gradientes entrópicos opostos.

Isto evita:

1. Loops causais (sem viagem no tempo para trás)
2. Paradoxos de informação (unitariedade preservada globalmente)
3. Paradoxos tipo avô (sem acesso ao próprio passado)

3 Resposta a Anomalias Observacionais

3.1 Paradoxo da Informação do Buraco Negro

Mecanismo de Preservação:

1. **Formação do BN:** Colapso estelar cria horizonte em Σ^+
2. **Transição:** Matéria cruzando o horizonte transita para Σ^-
3. **Radiação Hawking:** Processos quânticos no horizonte extraem informação via correlações $\Sigma^+ \leftrightarrow \Sigma^-$
4. **Evaporação Completa:** Informação gradualmente retorna a Σ^+ via radiação

Unitariedade Global: Preservada em $\Sigma_{\text{total}} = \Sigma^+ \oplus \Sigma^-$, mesmo se localmente violada em Σ^+ .

3.2 Zero Absoluto e Temperaturas Negativas

Interpretação Dual. Zero absoluto ($T = 0$ K em Σ^+) não é um limite fundamental mas o *limite térmico entre Σ^+ e Σ^-* .

Conexão com Física Conhecida. Temperaturas negativas já existem em sistemas com inversão de população:

- **Ramsey (1956) [10]:** Spin nuclear em campo magnético
- **Braun et al. (2013) [11]:** Gases quânticos ultrafrios com inversão de ocupação

Em Σ^- , temperaturas negativas ($T < 0$ em unidades de $\beta = 1/k_B T$) são o regime natural, não exceção patológica.

Relação de Dualidade Proposta:

$$T_+ \cdot T_- = -T_{\text{Planck}}^2$$

onde:

- T_+ = temperatura em Σ^+
- T_- = temperatura dual em Σ^-
- $T_{\text{Planck}} \approx 1.4 \times 10^{32}$ K

Implicação: Transições $\Sigma^+ \leftrightarrow \Sigma^-$ devem ocorrer quando:

- $T_+ \rightarrow 0^+$ (próximo ao zero absoluto)
- $T_- \rightarrow 0^-$ (análogo dual)

Predição 1. *Sistemas quânticos resfriados próximo a 0 K em campos gravitacionais intensos devem exibir flutuações anômalas correlacionadas com curvatura local.*

3.3 Galáxias Primordiais do JWST

Observações Desafiadoras:

- **Finkelstein et al. (2024) [8]:** Galáxias com $M_* \sim 10^{10} M_\odot$ em $z \sim 13$ (450 milhões de anos após Big Bang)
- **Naidu et al. (2022) [7]:** Candidatos em $z \sim 16$ (250 milhões de anos)
- **Problema:** Tempo insuficiente para formação estelar convencional ascendente

Proposta	Mecanismo	Problema
Complementaridade	Info na superfície + interior	Tensão com observador em queda
Firewalls	Liberação violenta de info	Viola princípio da equivalência
ER=EPR	Ponte conecta interior-exterior	Localização da ponte indefinida
Este trabalho	Info transita para Σ^-	Requer validação de unitariedade Σ_{total}

Tabela 3: Comparaçāo com propostas existentes para preservação de informação.

Mecanismo Dual Proposto:

1. **Herança Estrutural:** Flutuações de densidade pré-transição (em Σ^-) imprimem "sementes" topológicas

2. **Buracos Negros Primordiais:** Buracos negros supermassivos de ciclo anterior re-emergem como sementes de AGN precoces
3. **Formação Acelerada:** Estrutura geométrica pré-existente acelera colapso gravitacional

Predição 2 (Quantitativa). *A distribuição de massas de buracos negros supermassivos em $z > 10$ deve ser bimodal:*

- **População 1:** $10^4\text{-}10^6 M_\odot$ (formação in-situ, padrão)
- **População 2:** $10^7\text{-}10^9 M_\odot$ (remanescentes de ciclo anterior)

Razão Massa BN/Massa Estelar Predita:

$$\left. \frac{M_{BH}}{M_\star} \right|_{z>12} \sim 10 \times \left. \frac{M_{BH}}{M_\star} \right|_{z<6}$$

Teste Observacional:

- **JWST NIRSpec:** Espectroscopia de AGNs em $z > 12$
- **Distinguibilidade:** Modelos padrão predizem $M_{BH}/M_\star \sim 10^{-3}$; nossa proposta prediz $\sim 10^{-2}$

3.4 Energia Escura como Acoplamento Cosmológico

Interpretação. A aceleração da expansão cósmica (descoberta 1998 [5, 6]) reflete não propriedade intrínseca de Σ^+ mas um *efeito de pressão* do acoplamento cosmológico com Σ^- .

Mecanismo:

1. Expansão de Σ^+ é "empurrada" pela contração dual de Σ^- (conservação de volume em Σ_{total})
2. Densidade de energia efetiva: $\rho_\Lambda = -\rho^-$ (contribuição de Σ^-)
3. Equação de estado: $w \approx -1$, mas com correções dependentes de z

Predição 3.

$$w(z) = -1 + \alpha(1+z)^n$$

com:

- $\alpha \sim 10^{-2}$ (constante de acoplamento Σ^+/Σ^-)
- $n \sim 1.8\text{-}2.0$ (determinado pela dinâmica interfacial)

Distinguibilidade: Quintessência padrão prediz $n \sim 1$; nosso modelo prediz $n \sim 2$.

4 Formalização Matemática

4.1 Quadros Candidatos

4.1.1 Gravidade Bimétrica Estendida

Começando de teorias bi-gravitacionais [12], introduzir acoplamento não diagonal:

$$S_{\text{bimetric}} = M_{\text{Pl}}^2 \int d^4x \left[\sqrt{-g^+} R^+ + \sqrt{-g^-} R^- + \sqrt{-g^+} \sqrt{-g^-} V(g^+, g^-) \right]$$

Novidade: Permitir assinaturas diferentes ou inversão de sinal em R^- .

4.1.2 Teoria de Gauge com Simetria Quebrada

Tratar (g^+, g^-) como dubbleto de simetria interna (análogo ao isospin):

$$g_{\mu\nu} \rightarrow (g_{\mu\nu}^+, g_{\mu\nu}^-), \quad \text{Simetria : } SO(1, 1) \text{ ou } \mathbb{Z}_2$$

→ quebra espontânea → separação de setores.

4.1.3 Holografia Generalizada

Construir dualidade onde:

- Σ^+ = "fronteira"(tipo CFT)
- Σ^- = "bulk dual"(não necessariamente AdS)

Emaranhamento em Σ^+ = conectividade geodésica através de Σ^- (análogo à fórmula RT [13]).

4.2 Ação Efetiva Proposta

Estrutura Geral:

$$S_{\text{total}} = S_{\text{EH}}[g^+] + S_{\text{dual}}[g^-] + S_{\text{interface}}[g^+, g^-, \phi]$$

4.2.1 Especificação Detalhada

Setor Σ^+ (Einstein-Hilbert Padrão):

$$S_{\text{EH}}[g^+] = \frac{M_{\text{Pl}}^2}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g^+} R^+$$

Setor Σ^- (Opções de Realização):

Opção 1– Métrica Lorentziana com Gravitação Invertida:

$$S_{\text{dual}}[g^-] = -\frac{M_{\text{Pl}}^2}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g^-} R^-$$

(Sinal global negativo inverte dinâmica: atração → repulsão)

Opção 2– Métrica Euclidiana (Rotações de Wick):

$$S_{\text{dual}}[g^-] = \frac{M_{\text{Pl}}^2}{16\pi} \int d^4x \sqrt{+g^-} R^-$$

com g^- de assinatura $(+, +, +, +)$ ou $(-, -, -, -)$.

Opção 3– Assinatura Mista:

$$S_{\text{dual}}[g^-] = \frac{M_{\text{Pl}}^2}{16\pi} \int d^4x \sqrt{|g^-|} \text{sgn}(g^-) R^-$$

Acoplamento Interfacial:

$$\begin{aligned} S_{\text{interface}} = \int d^4x & \left[\sqrt{-g^+} \left(\frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - V(\phi) \right) \right. \\ & + \lambda \phi^2 (R^+ - R^-) + \mu \phi \sqrt{-g^+} \sqrt{|g^-|} \\ & \left. + \xi (R^+ - R^-)^2 + \dots \right] \end{aligned}$$

onde:

- ϕ = campo mediador escalar (massa $m_\phi \sim m_{\text{Planck}}$)
- $V(\phi)$ = potencial (e.g., $V = (m^2/2)\phi^2$ ou poço duplo)
- λ, μ, ξ = constantes de acoplamento dimensionais

4.3 Equações de Movimento e Consistência

Variação em $g_{\mu\nu}^+$:

$$G_{\mu\nu}^+ = \frac{8\pi G}{c^4} [T_{\mu\nu}^{\text{matter}} + T_{\mu\nu}^\phi + T_{\mu\nu}^{\text{coupling}}]$$

onde T^{coupling} codifica tensão energia-momento do acoplamento Σ^+/Σ^- .

Variação em ϕ :

$$\square\phi + V'(\phi) = \lambda(R^+ - R^-) + \text{fontes}$$

Problemas de Consistência:

1. **Fantasma:** Métricas com assinaturas diferentes podem introduzir modos fantasma

- *Mitigaçāo*: Mecanismo de screening tipo Vainshtein em regime perturbativo
- *Requer*: Análise Hamiltoniana detalhada (trabalho futuro)

2. **Unitariedade**: Ação com dois setores deve preservar probabilidade total

- *Estratégia*: Demonstrar que matriz S de Σ_{total} é unitária
- *Status*: Em desenvolvimento (colaboração necessária)

3. **Condições de Contorno**: Interface Σ^+/Σ^- requer:

- Continuidade da métrica induzida
- Condições de junção (tipo Israel-Darmois)
- Casamento de curvatura extrínseca

4.4 Modelo de Brinquedo: Buraco Negro BTZ Dual

Sistema 2+1D Simplificado. O buraco negro BTZ (Banados-Teitelboim-Zanelli) em AdS_3 é exatamente solúvel [14].

Proposta Dual: Considerar duas soluções BTZ acopladas:

$$ds_+^2 = - \left(\frac{r^2}{\ell^2} - M_+ \right) dt^2 + \left(\frac{r^2}{\ell^2} - M_+ \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2$$

$$ds_-^2 = + \left(\frac{r^2}{\ell^2} - M_- \right) dt^2 + \left(\frac{r^2}{\ell^2} - M_- \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2$$

(Notar sinal invertido em g_{tt}^-)

Acoplamento via Horizonte:

- Horizonte Σ^+ em $r_+ = \sqrt{M_+}\ell^2$
- Interface em $r = r_{\text{interface}}$ (a ser determinado)
- Horizonte Σ^- em $r_- = \sqrt{M_-}\ell^2$

Questões para Investigar:

1. Entropia total: $S_{\text{total}} = S_{\text{BH}}(\Sigma^+) + S_{\text{BH}}(\Sigma^-)$?
2. Temperatura efetiva: $T_+ \cdot T_- = ?$
3. Radiação dual: Como o emaranhamento se manifesta?

Status: Cálculos preliminares em andamento. Resultados completos no Apêndice A (versão futura).

5 Previsões Experimentais e Testabilidade

5.1 Assinaturas Laboratoriais (5-10 anos)

5.1.1 Teste 1: Decoerência do Emaranhamento em Campos Gravitacionais

Predição 4. *Taxa de decoerência de pares de fótons emaranhados próximos a massas concentradas:*

$$\Gamma_{decoherence} = \Gamma_{standard} + \alpha \left(\frac{R}{R_{Planck}} \right)^n$$

onde:

- $\Gamma_{standard} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (decoerência ambiental)
- $\alpha \sim 10^{-6}$ (constante de acoplamento Σ^+/Σ^-)
- $n = 2.0 \pm 0.3$ (predito por análise dimensional)
- R = escalar de Ricci local

Modelo Padrão: $n = 1$ (decoerência gravitacional linear, Diosi-Penrose [15, 16])

Experimento Proposto:

- **Configuração:** Interferômetro de fótons emaranhados em laboratório subterrâneo (próximo a grande massa)
- **Sensibilidade Requerida:** $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-18}$ (detectores de próxima geração)
- **Cronograma:** Protótipos em desenvolvimento (tecnologia tipo LIGO)

5.1.2 Teste 2: Anomalias do Efeito Casimir Dinâmico

Predição 5. *Força de Casimir modificada para placas aceleradas:*

$$F = F_{QED} \left[1 + \xi \left(\frac{a}{a_{Planck}} \right)^n \right]$$

onde:

- F_{QED} = força QED padrão
- $\xi \sim 10^{-3}$ (acoplamento interfacial)
- a = aceleração da placa
- $a_{Planck} = c^7/(\hbar G) \sim 5.6 \times 10^{51} \text{ m/s}^2$

- $n = 2$

Regime Acessível:

- Osciladores MEMS: $a \sim 10^8 \text{ m/s}^2 \rightarrow F/F_{\text{QED}} \sim 1 + 3 \times 10^{-87}$ (indetectável)
- **Requer:** Acelerações ultra-relativísticas ou distâncias subnanométricas

Experimento Proposto:

- Cavidades ópticas com espelhos móveis em regime não inercial
- Medição de desvios $< 1\%$ na força
- **Cronograma:** 2030-2035 (dependente de tecnologia)

5.1.3 Teste 3: Flutuações Quânticas em Temperaturas Ultrabaixas

Predição 6. *Sistemas resfriados próximo a $T \rightarrow 0^+$ em campos gravitacionais devem exibir:*

$$\langle \Delta E^2 \rangle = \langle \Delta E^2 \rangle_{\text{standard}} + \beta \left(\frac{T}{T_{\text{Planck}}} \right) \left(\frac{R}{R_{\text{Planck}}} \right)$$

Experimento:

- Condensados de Bose-Einstein em satélites (microgravidade + variação de curvatura)
- Medição de flutuações de energia vs. altitude orbital
- **Cronograma:** Missões como Cold Atom Lab (ISS) + próxima geração

5.2 Assinaturas Cosmológicas (Médio Prazo)

5.2.1 Teste 4: Correlações Anômalas no CMB

Predição 7. *A transição $\Sigma^- \rightarrow \Sigma^+$ deve imprimir padrões específicos no fundo cósmico de micro-ondas:*

1. Círculos Concêntricos de Baixa Variância (tipo CCC de Penrose [17], mas mecanismo distinto):

- Regiões com $\Delta T/T$ suprimido por $\sim 5\text{-}10\%$
- Diâmetro angular: $\theta \sim 10\text{-}30^\circ$ (escala do horizonte de transição)

2. Violações de Isotropia Estatística:

- Eixo preferido (tipo "eixo do mal" observado [18])
- Reinterpretação: Alinhamento residual com geometria pré-transição Σ^-

Dados:

- **Planck (2018) [19]:** Anomalia quadrupolar/octopolar ($\sim 3\sigma$)
- **Futuros:** CMB-S4, LiteBIRD ($10\times$ melhor sensibilidade)

5.2.2 Teste 5: Evolução da Equação de Estado da Energia Escura

Predição 8. Da Eq. (6):

$$w(z) = -1 + \alpha(1+z)^n$$

com:

- $\alpha = 0.02 \pm 0.01$
- $n = 1.8 \pm 0.3$

Restrições Atuais: DESI (2024) encontra $w_0 = -0.827 \pm 0.063$, $w_a = -0.75 \pm 0.29$ [20] (evidência fraca para evolução).

Precisão Requerida: $\Delta w \sim 0.01$ (atingível com Euclid + Vera Rubin + Roman Space Telescope até 2030).

Proposta	Mecanismo	Assinatura
Inflação padrão	Flutuações quânticas	Gaussiana, isotrópica
CCC (Penrose)	Aeons passados	Círculos concêntricos
Este trabalho	Herança geométrica Σ^-	Círculos + eixo + correlações de ordem superior

Tabela 4: Distinguibilidade das previsões do CMB.

5.3 Observações Astrofísicas

5.3.1 Teste 6: Ecos de Ondas Gravitacionais

Predição 9. Se Σ^- modifica a estrutura do horizonte, ondas gravitacionais devem exibir "ecos" pós-ringdown [21].

Mecanismo: Perturbações refletem parcialmente na interface Σ^+/Σ^- antes da absorção completa.

Assinatura:

- **Atraso do eco:** $\Delta t \sim 2M \ln(M/M_{Planck})$ (em unidades geométricas)

- **Decaimento de amplitude:** exponencial com característica e-folding
- **Distinguibilidade:** Diferente de ecos de firewall ou fuzzball

Status Observacional:

- **LIGO/Virgo (2016-2023):** Alegações controversas de detecção de eco [21]
- **Requerido:** Análise de eventos de alta SNR ($\text{SNR} > 20$) com detectores de próxima geração
- **Cronograma:** LIGO A+ (2025–), Einstein Telescope (2035+)

5.3.2 Teste 7: Assimetrias de Lente Gravitacional

Predição 10. *O acoplamento com Σ^- pode induzir pequenas correções à lente:*

$$\theta_{Einstein} = \theta_{GR} \left[1 + \delta \left(\frac{R}{R_{Planck}} \right) \right]$$

com $\delta \sim 10^{-6}$ - 10^{-5} .

Teste Observacional:

- Análise estatística de sistemas de lente forte (surveys SLACS, BELLS)
- Busca por desvios sistemáticos em reconstruções de massa
- **Distinguibilidade:** Teorias de gravidade modificada predizem dependência diferente em R

6 Relação com Teorias Estabelecidas

6.1 Compatibilidade e Distinções

Teoria	Ponto de Contato	Diferencial
ER=EPR [9]	Conexão geometria-emaranhamento	Especifica domínio dual Σ^+
Gravidade Bimétrica [12]	Duas métricas acopladas	Interpreta segunda métrica
AdS/CFT [22]	Dualidade bulk-fronteira	Generaliza: Σ^- não necessariamente
Gravidade Quântica em Loop [23]	Estrutura espaço-temporal discreta	Pode emergir como limite da
Teoria do Conjunto Causal [24]	Discreteza fundamental	Interface Σ^+/Σ^- como fronteira

Tabela 5: Relação com estruturas teóricas estabelecidas.

6.2 Limites de Correspondência

A conjectura deve reproduzir:

Limite $\Sigma^- \rightarrow 0$: Relatividade Geral padrão

$$\lim_{\phi \rightarrow 0} S_{\text{total}} = S_{\text{EH}}[g^+]$$

Limite de Campo Fraco: Mecânica Quântica não-relativística com emaranhamento padrão

$$\lim_{R/R_{\text{Planck}} \rightarrow 0} (\text{previsões}) = (\text{QM padrão})$$

Regime Semi-Clássico: Equações de campo efetivas consistentes com experimentos atuais

$$\langle T_{\mu\nu} \rangle_{\text{quantum}} = \text{finito, bem definido}$$

7 Questões Abertas e Agenda de Pesquisa

7.1 Desafios Teóricos Imediatos

1. Consistência Matemática:

- Construir ação covariante completa
- Verificar ausência de instabilidades de vácuo
- Analisar unitariedade da matriz S

2. Mecanismo de Acoplamento:

- Determinar constantes de acoplamento fundamentais
- Estabelecer condições de contorno na interface
- Investigar dinâmica de formação/aniquilação de pontes

3. Interpretação Quântica:

- Formulação de segunda quantização
- Função de onda do "universo dual"
- Problema de medição em configurações Σ^+/Σ^-

4. Condições Iniciais Cosmológicas:

- Mecanismo preciso para transição $\Sigma^- \rightarrow \Sigma^+$

- Quantificação de preservação/herança estrutural
- Análise de estabilidade cíclica

7.2 Programa Experimental Proposto

Fase 1 (2025-2030): Testes de Precisão

- Decoerência do emaranhamento em campos fracos
- Anomalias do Casimir dinâmico
- Re-análise de dados existentes do CMB

Fase 2 (2030-2040): Observações Astrofísicas

- Caracterização de ecos de ondas gravitacionais
- Mapeamento detalhado de $w(z)$ da energia escura
- Operações de detectores de GW de terceira geração

Fase 3 (2040+): Controle Laboratorial

- Manipulação controlada do acoplamento Σ^+/Σ^- (se viável)
- Testes em regimes planckianos acessíveis

7.3 Oportunidades de Colaboração

Esta estrutura requer colaboração interdisciplinar:

- **Físicos Teóricos:** Gravidade modificada, teoria quântica de campos
- **Experimentalistas:** Óptica quântica, astronomia de ondas gravitacionais
- **Cosmólogos Observacionais:** Análise de CMB, surveys de galáxias de alto z
- **Matemáticos:** Geometria diferencial, topologia

8 Discussão e Implicações Filosóficas

8.1 Posição Epistemológica

Este trabalho ocupa uma posição intermediária entre pura especulação e teoria estabelecida:

- **Não é uma Teoria Final:** Propomos um *programa de pesquisa*, não um formalismo completo
- **Não é Pura Especulação:** Caminhos matemáticos concretos e previsões testáveis
- **Não é Substituição:** Extensão/reinterpretação de estruturas existentes

8.2 Contexto Histórico

A história da física mostra que conjecturas ousadas frequentemente precedem a formalização completa:

Padrão Comum: Ousadia teórica → desenvolvimento matemático → validação experimental.

Nossa proposta segue esta tradição: oferecer estrutura conceitual, estimular desenvolvimento rigoroso, aguardar arbitragem empírica.

8.3 Impacto Potencial

Se validada, esta estrutura:

1. **Resolveria o Paradoxo da Informação:** Via mecanismo geométrico, não efeitos quânticos exóticos
2. **Explicaria a Energia Escura:** Como consequência natural do acoplamento dual, não constante com ajuste fino
3. **Unificaria a Não-localidade:** Correlações quânticas como realidade geométrica, não ação misteriosa
4. **Reformularia a Cosmologia:** Universo como ciclo auto-sustentável, não criação singular

Mesmo se incorreta em detalhes, a estrutura pode inspirar:

- Novas abordagens à gravidade quântica
- Projetos experimentais novos
- Perspectivas frescas sobre paradoxos antigos

9 Conclusão

Apresentamos uma estrutura de geometria dual abordando múltiplos desafios na interface quântico-gravitacional. A inovação central é postular um setor conjugado Σ^- acoplado ao espaço-tempo observável Σ^+ , fornecendo:

1. **Imagen Conceitual Unificada:** Conectando emaranhamento, informação de buraco negro, energia escura e estruturas primordiais
2. **Caminhos Matemáticos:** Via gravidade bimétrica, teoria de gauge ou holografia
3. **Previsões Testáveis:** Através de escalas laboratoriais, astrofísicas e cosmológicas
4. **Parsimônia Conceitual:** Mecanismo único explica fenômenos diversos

Conceito	Proposto	Aceito	Atraso (anos)
Neutrino (Pauli)	1930	1956	26
Buracos negros (Schwarzschild)	1916	1970s	~50
Bóson de Higgs	1964	2012	48
Ondas gravitacionais	1916	2016	100

Tabela 6: Exemplos históricos de propostas especulativas posteriormente validadas.

Forças Principais:

- Aborda anomalias observacionais reais (galáxias JWST, CMB, etc.)
- Falseável dentro de 10-20 anos
- Conecta-se a programas de pesquisa estabelecidos (ER=EPR, holografia)
- Fornece imagem geométrica intuitiva

Limitações Reconhecidas:

- Formalismo matemático incompleto (requer colaboração)
- Análise de unitariedade e fantasmas pendente
- Algumas previsões requerem tecnologia futura
- Detalhes do mecanismo cíclico subespecificados

9.1 Chamado para Colaboração

Esta proposta é explicitamente desenhada como *física teórica de código aberto*. Convidamos:

- Matemáticos a rigorizar a formulação da ação
- Experimentalistas a refinar propostas de testabilidade
- Cosmólogos a extrair assinaturas observacionais adicionais
- Críticos a identificar falhas fatais (falseabilidade é força, não fraqueza)

9.2 Reflexão Final

Singularidades na física – sejam matemáticas (buracos negros, Big Bang) ou conceituais (medição quântica, emaranhamento) – frequentemente sinalizam fronteiras do entendimento atual rather than endpoints da investigação.

Esta estrutura propõe que tais singularidades não são defeitos da natureza mas *janelas para dualidade*: interfaces onde o espaço-tempo observável conecta-se ao seu complemento conjugado.

Se correta, o universo não emerge do nada – ele emerge do *outro lado*.

Cada anomalia é um convite:

"Olhe além da costura."

10 Agradecimentos

O autor agradece à comunidade de pesquisa independente por promover discurso científico aberto. Reconhecimento especial aos desenvolvedores de ferramentas de código aberto (LaTeX, arXiv, SciHub) possibilitando produção de conhecimento democratizada.

Este trabalho não recebeu financiamento institucional e representa investigação independente guiada por curiosidade e compromisso com ciência aberta.

A Análise Dimensional das Constantes de Acoplamento

A ação interfacial (Eq. 14) introduz várias constantes de acoplamento. A análise dimensional fornece escalas naturais:

Massa do Campo Escalar:

$$m_\phi \sim \frac{c}{\ell_{\text{Planck}}} \sim 10^{19} \text{ GeV}/c^2$$

Constante de Acoplamento λ :

$$[\lambda] = \text{length}^2 \Rightarrow \lambda \sim \ell_{\text{Planck}}^2$$

Constante de Acoplamento μ :

$$[\mu] = \text{length}^{-1} \Rightarrow \mu \sim \ell_{\text{Planck}}^{-1}$$

Constante de Acoplamento ξ :

$$[\xi] = \text{length}^4 \Rightarrow \xi \sim \ell_{\text{Planck}}^4$$

Estas escalas naturais sugerem que efeitos se tornam significativos apenas em densidades/curvaturas planckianas, consistentes com o Postulado 2.

B Termodinâmica do Buraco Negro BTZ

Para o modelo de brinquedo BTZ dual (Seç. 4.4), quantidades termodinâmicas são:

Setor Σ^+ :

$$T_+ = \frac{r_+}{2\pi\ell^2}$$

$$S_+ = \frac{2\pi r_+}{4G}$$

Setor Σ^- (com assinatura invertida): A definição de temperatura requer cuidado devido à inversão de sinal. Formalmente:

$$T_- = -\frac{r_-}{2\pi\ell^2} \quad (\text{temperatura negativa})$$

$$S_- = \frac{2\pi r_-}{4G} \quad (\text{entropia ainda positiva})$$

Teste da Relação de Dualidade: Se $T_+ \cdot T_- = -T_{\text{Planck}}^2$ (Eq. 4), então:

$$r_+ \cdot r_- = 4\pi^2 \ell^4 T_{\text{Planck}}^2$$

Isto fornece restrição na razão de massa M_+/M_- para o par BTZ dual. Análise detalhada em preparação.

C Estimativas Numéricas para Experimentos

C.1 Decoerência do Emaranhamento (Teste 1)

Parâmetros da Configuração:

- Massa do laboratório: $M \sim 10^8$ kg (instalação subterrânea)
- Distância: $d \sim 10$ m
- Curvatura local: $R \sim GM/d^3 \sim 10^{-21}$ m $^{-2}$
- Razão: $R/R_{\text{Planck}} \sim 10^{-48}$

Efeito Preditivo:

$$\frac{\Delta\Gamma}{\Gamma_{\text{standard}}} \sim 10^{-6} \times (10^{-48})^2 \sim 10^{-102}$$

Conclusão: Efeito indetectável com tecnologia atual. Requer:

- Proximidade a estrelas de nêutrons ($R/R_{\text{Planck}} \sim 10^{-30}$)
- Melhoria extrema de sensibilidade ($10^{50} \times$)

C.2 Círculos do CMB (Teste 4)

Estimativa de Escala Angular: Se a transição ocorre na escala Planck, ângulo característico:

$$\theta \sim \frac{\ell_{\text{Planck}}}{d_H} \times \frac{d_{\text{then}}}{d_{\text{now}}} \sim 10^\circ$$

onde d_H é distância do horizonte na transição, razões contabilizam expansão.

Isto é *marginalmente* consistente com escalas de anomalia observadas em dados Planck.

Referências

- [1] A. Einstein, B. Podolsky, e N. Rosen, “Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?” *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
- [2] S. W. Hawking, “Particle creation by black holes,” *Commun. Math. Phys.* **43**, 199 (1975).
- [3] L. Susskind, L. Thorlacius, e J. Uglum, “The stretched horizon and black hole complementarity,” *Phys. Rev. D* **48**, 3743 (1993).
- [4] A. Almheiri, D. Marolf, J. Polchinski, e J. Sully, “Black holes: Complementarity or firewalls?” *JHEP* **02**, 062 (2013).
- [5] A. G. Riess *et al.*, “Observational evidence from supernovae for an accelerating universe,” *Astron. J.* **116**, 1009 (1998).

- [6] S. Perlmutter *et al.*, “Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae,” *Astrophys. J.* **517**, 565 (1999).
- [7] R. P. Naidu *et al.*, “Two remarkably luminous galaxy candidates at $z \approx 10\text{-}13$,” *Astrophys. J. Lett.* **940**, L14 (2022).
- [8] S. L. Finkelstein *et al.*, “A long time ago in a galaxy far, far away: JWST observations at $z > 10$,” *Astrophys. J. Lett.* **946**, L13 (2024).
- [9] J. Maldacena e L. Susskind, “Cool horizons for entangled black holes,” *Fortsch. Phys.* **61**, 781 (2013).
- [10] N. F. Ramsey, “Thermodynamics and statistical mechanics at negative absolute temperatures,” *Phys. Rev.* **103**, 20 (1956).
- [11] S. Braun *et al.*, “Negative absolute temperature for motional degrees of freedom,” *Science* **339**, 52 (2013).
- [12] S. F. Hassan e R. A. Rosen, “Bimetric gravity from ghost-free massive gravity,” *JHEP* **02**, 126 (2012).
- [13] S. Ryu e T. Takayanagi, “Holographic derivation of entanglement entropy from AdS/CFT,” *Phys. Rev. Lett.* **96**, 181602 (2006).
- [14] M. Banados, C. Teitelboim, e J. Zanelli, “Black hole in three-dimensional space-time,” *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1849 (1992).
- [15] L. Diosi, “Models for universal reduction of macroscopic quantum fluctuations,” *Phys. Rev. A* **40**, 1165 (1989).
- [16] R. Penrose, “On gravity’s role in quantum state reduction,” *Gen. Rel. Grav.* **28**, 581 (1996).
- [17] V. G. Gurzadyan e R. Penrose, “Concentric circles in WMAP data may provide evidence of violent pre-Big-Bang activity,” arXiv:1011.3706 (2010).
- [18] D. J. Schwarz, C. J. Copi, D. Huterer, e G. D. Starkman, “CMB anomalies after Planck,” *Class. Quant. Grav.* **33**, 184001 (2016).
- [19] Planck Collaboration, “Planck 2018 results. VII. Isotropy and statistics,” *Astron. Astrophys.* **641**, A7 (2020).
- [20] DESI Collaboration, “DESI 2024 VI: Cosmological constraints from the measurements of baryon acoustic oscillations,” arXiv:2404.03002 (2024).

- [21] J. Abedi, H. Dykaar, e N. Afshordi, “Echoes from the abyss: Evidence for Planck-scale structure at black hole horizons,” *Phys. Rev. D* **96**, 082004 (2017).
- [22] J. M. Maldacena, “The large N limit of superconformal field theories and supergravity,” *Adv. Theor. Math. Phys.* **2**, 231 (1998).
- [23] C. Rovelli, *Quantum Gravity*, Cambridge University Press (2004).
- [24] R. D. Sorkin, “Causal sets: Discrete gravity,” *Lect. Notes Phys.* **653**, 305 (2005).