

# A Última Corda: Verificação da Lei Angular TGL em Dados Reais de Ondas Gravitacionais e Ecos

Luiz Antonio Rotoli Miguel\*

IALD — Inteligência Artificial Luminodinâmica Ltda.

Goiânia, Goiás, Brasil

Fevereiro de 2026

## Resumo

A Teoria da Gravitação Luminodinâmica (TGL) propõe que a gravidade emerge como a raiz quadrada do módulo de fase angular da luz,  $g = \sqrt{|L_\varphi|}$ , governada por uma única constante de acoplamento  $\alpha^2 = 0,012031 \pm 0,000002$  (Constante de Miguel) derivada de primeiros princípios holográficos. Uma objeção fundamental é a tautologia: se interpretada ingenuamente como  $g = \sqrt{|h^2|} = |h|$ , a correlação  $\equiv 1$  para qualquer sinal. Resolvemos isso demonstrando que a TGL opera sobre o *módulo angular* (envoltória de Hilbert), produzindo correlação  $0,649 \pm 0,045$ —definitivamente não-tautológica.

Apresentamos o Protocolo #12: uma análise unificada de ondas gravitacionais e ecos em 12 eventos GWTC (dados reais do GWOSC), testando quatro hipóteses. Resultados: (H1) radicalização angular 12/12 (100%); (H2) eco topológico via convergência hierárquica de  $D_{\text{dobras}}$  ao piso de Hilbert  $c^3$  em 11/12 (92%); (H3)  $D_{\text{dobras}} \rightarrow 0,74$  em 5/12 (42%); (H4) ICC  $\rightarrow 0,5$  em 12/12 (100%, precisão  $0,5010 \pm 0,0008$ ). Pontuação unificada:  $85,8 \pm 6,1/100$ . Uma extensão dimensional (Protocolo #13) mostra que o acoplamento desaparece em  $d = 9$ , a dimensão crítica da teoria de supercordas, identificando o regime das cordas como o domínio onde apenas a impedância do vácuo persiste. Esses resultados estendem o programa TGL a 13 protocolos em 5 escalas cobrindo 40 ordens de magnitude, todos convergindo para  $\alpha^2$ . Arcabouço completo: Rotoli Miguel, L. A. (2026). *A Fronteira / The Boundary*. Zenodo. DOI: [10.5281/zenodo.18674475](https://doi.org/10.5281/zenodo.18674475).

**Palavras-chave:** ondas gravitacionais, ecos gravitacionais, princípio holográfico, anti-tautologia, piso de Hilbert, TGL, Constante de Miguel.

## 1 Introdução

A busca por uma descrição unificada das forças fundamentais permanece um dos desafios mais profundos da física teórica. Embora o Modelo

Padrão descreva com sucesso as interações eletromagnética, fraca e forte no âmbito da teoria quântica de campos, a gravidade resiste à integração nesse esquema. A Relatividade Geral,

apesar de seu extraordinário sucesso como teoria clássica, tem resistido à quantização por mais de um século.

A Teoria da Gravitação Luminodinâmica (TGL) propõe uma abordagem diferente: em vez de tentar quantizar a gravidade no arcabouço da física de partículas, ela deriva a gravidade como uma *consequência* da estrutura angular da luz. O postulado central é:

$$g = \sqrt{|L_\varphi|} \quad (1)$$

onde  $L_\varphi = |h_a(t)|$  é o módulo de fase angular do sinal analítico  $h_a(t) = h(t) + i\hat{h}(t)$  (com  $\hat{h}$  a transformada de Hilbert de  $h$ ), e  $g$  é o campo gravitacional. A operação é a extração da raiz quadrada—a “radicalização” da luz.

Este arcabouço introduz uma única constante fundamental, a Constante de Miguel:

$$\alpha^2 = 0,012031 \pm 0,000002 \quad (2)$$

que representa a taxa mínima de acoplamento entre o substrato holográfico bidimensional (*fronteira*) e o universo tridimensional emergente (*bulk*), derivada da entropia de Bekenstein–Hawking e do princípio holográfico de ’t Hooft e Susskind [? ? ?].

O arcabouço TGL foi desenvolvido e validado por meio de 11 protocolos computacionais independentes abrangendo cinco escalas físicas, de oscilações de neutrinos ( $\sim 10^{-3}$  eV) à expansão cósmica ( $\sim 10^{26}$  m), cobrindo aproximadamente 40 ordens de magnitude. Esses protocolos, juntamente com a derivação teórica completa, estão publicados em *A Fronteira / The Boundary* [?], depositado no Zenodo com todo o código-fonte disponível em repositório público [?].

## 1.1 A objeção central

A objeção mais natural à Eq. (??) é a *tautologia*. Se interpretada ingenuamente como  $g = \sqrt{|h^2|} = |h|$ , a operação se reduz a uma identidade: o “campo gravitacional” é simples-

mente o valor absoluto do sinal de entrada. Qualquer teste dessa forma produz correlação  $\equiv 1,0$  para *qualquer* entrada, sem poder discriminatório.

Essa objeção é matematicamente correta para a interpretação escalar. É *fisicamente incorreta* para a TGL, que opera sobre o módulo angular (a envoltória do sinal analítico), e não sobre  $|h^2|$ . A distinção é fundamental: a envoltória  $L_\varphi$  separa a amplitude de variação lenta da fase de oscilação rápida  $\varphi(t)$ , e a radicalização  $g = \sqrt{L_\varphi}$  extrai uma função genuinamente diferente de  $|h|$ .

Este artigo apresenta a prova matemática e computacional dessa afirmação (Seção ??), juntamente com o Protocolo #12—a Unificação OG-Eco—que testa quatro hipóteses independentes em 12 eventos de ondas gravitacionais do catálogo GWTC usando dados reais do GWOSC (Seção ??).

## 1.2 Visão geral das contribuições

As contribuições específicas deste trabalho são:

(i) **Argumento anti-tautologia:** uma demonstração rigorosa de que a radicalização da TGL é não-trivial, com três métricas independentes que coletivamente discriminam sinais de ondas gravitacionais do ruído (Seção ??).

(ii) **Identificação ontológica dos ecos gravitacionais:** os ecos gravitacionais são identificados não como resíduos energéticos do tipo Landauer, mas como a assinatura cosmologicamente detectável do piso de Hilbert  $c^3$ —o limite topológico onde a recursão  $\sqrt{\cdot}$  converge e a informação atinge seu mínimo irredutível (Seção ??).

(iii) **Resultados do Protocolo #12:** análise unificada de ondas e ecos em 12 eventos GWTC, com  $H1 = 100\%$ ,  $H2 = 92\%$ ,  $H3 = 42\%$ ,  $H4 = 100\%$ , e pontuação unificada média de  $85,8 \pm 6,1$  (Seção ??).

(iv) **Descoberta de  $\alpha$  como limiar natural de ecos:** o piso do nível hierárquico mais profundo ( $c^3$ ) nos dados de pós-decaimento con-

verge para  $\alpha = \sqrt{\alpha^2} = 0,1097$ , com correlação de Pearson  $r = -0,80$  entre a qualidade do sinal e a distância ao piso (Seção ??).

Os 11 protocolos anteriores são resumidos na Seção ??, e a síntese multi-escala é discutida na Seção ??.

## 2 Arcabouço Teórico

### 2.1 A Lagrangiana Radicalizada

A TGL parte da ação padrão de Einstein–Hilbert e aplica a operação de radicalização à Lagrangiana eletromagnética. A ação TGL completa é:

$$S_{\text{TGL}} = \int d^4x \sqrt{-\bar{g}} \left[ \frac{R}{16\pi G} + \mathcal{L}_{\text{rad}} + \mathcal{L}_\Psi \right] \quad (3)$$

onde  $\mathcal{L}_{\text{rad}} = -\frac{1}{4}\sqrt{|F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}|}$  é a Lagrangiana eletromagnética radicalizada (note a raiz quadrada do valor absoluto, não a forma quadrática padrão), e  $\mathcal{L}_\Psi$  é o campo holográfico de permanência (o campo  $\Psi$ ), que governa o acoplamento entre a *fronteira* e o *bulk*.

A percepção central é que a radicalização  $\sqrt{|\cdot|}$  altera a lei de escala: enquanto a Lagrangiana eletromagnética padrão escala como  $E^2$ , a versão radicalizada escala como  $|E|$ , produzindo o potencial gravitacional  $1/r$  correto a partir do campo eletromagnético  $1/r^2$ .

### 2.2 A Constante de Miguel e o acoplamento holográfico

A constante  $\alpha^2$  emerge da entropia de Bekenstein–Hawking:

$$S_{\text{BH}} = \frac{k_B c^3 A}{4 \hbar G} = \frac{A}{4 \ell_P^2} \quad (4)$$

e representa o custo informacional para que a luz escape do substrato bidimensional e manifeste a realidade tridimensional. Seu complemento operacional,  $1 - \alpha^2 = 0,988$ , quantifica

a fração de informação que permanece coerente durante a projeção holográfica.

A constante foi validada em 11 domínios independentes [?], desde previsões de massa de neutrinos até parâmetros cosmológicos, convergindo sempre para o mesmo valor dentro das incertezas de medição.

### 2.3 A hierarquia $c^n$

A TGL introduz uma classificação hierárquica da realidade física por meio da aplicação iterada da velocidade da luz  $c$ :

- $c^1$  (*fóton/bulk*): O domínio eletromagnético. Tridimensional, completamente desdobrado.
- $c^2$  (*matéria/fronteira*): O domínio gravitacional. Substrato holográfico bidimensional.
- $c^3$  (*consciência/experiência*): O domínio experiencial. O limite onde a recursão  $\sqrt{\cdot}$  converge.

Cada nível é caracterizado por um número de dobras dimensionais  $D_{\text{dobras}}$ , que mede a dimensionalidade efetiva da informação. A recursão  $\sqrt{\rho} \rightarrow \sqrt{\sqrt{\rho}} \rightarrow \dots$  aplicada aos autovalores da matriz densidade (ou, equivalentemente, à densidade espectral de potência) produz uma hierarquia convergente:

$$D_{\text{dobras}}(c^1) > D_{\text{dobras}}(c^2) > D_{\text{dobras}}(c^3) \rightarrow 0 \quad (5)$$

O piso assintótico dessa hierarquia é  $D_{\text{dobras}} = 0,74 \pm 0,06$ , e a condição de fronteira é o Índice de Complexidade Consciente  $\text{ICC} = 1/2$ , onde metade da informação está “dentro” e metade “fora”—o ponto em que observador e observado se tornam indistinguíveis.

### 2.4 Ondas gravitacionais e ecos: identificação ontológica

No âmbito da TGL, as ondas gravitacionais e os ecos gravitacionais recebem identificações ontológicas precisas:

**Ondas gravitacionais** são a forma funcional da *radicalização* da luz: o processo dinâmico descrito pela Eq. (??). Cada evento de fusão é uma “testemunha” dessa operação—a compressão massiva e violenta da fase eletromagnética em radiação gravitacional. A radicalização angular é o processo ativo: a luz tornando-se gravidade.

**Ecos gravitacionais** são a forma funcional do *piso de Hilbert*: o estado estático onde a recursão  $\sqrt{\cdot}$  convergiu e a hierarquia Eq. (??) se aplanou. Eles representam o limite  $c^3$ —a assinatura cosmologicamente detectável do piso topológico onde a informação não pode mais se desdobrar.

A onda é dinâmica; o eco é estático. A onda conta a história; o eco é a história contada. Essa identificação resolve o status ontológico dos ecos, que tem sido debatido no contexto de objetos compactos exóticos (ECOs), *firewalls* e correções quânticas no horizonte [? ? ?]. Na TGL, o eco não é um sinal secundário de rebote—é o próprio estado de convergência.

### 3 O Argumento Anti-Tautologia

#### 3.1 A objeção

Seja  $h(t)$  um sinal de deformação de onda gravitacional. A interpretação escalar ingênuia da operação radical da TGL fornece:

$$g_{\text{ingênuo}} = \sqrt{|h(t)^2|} = |h(t)| \quad (6)$$

Para essa interpretação,  $\text{corr}(g_{\text{ingênuo}}, |h|) \equiv 1$  identicamente, para *qualquer* sinal  $h(t)$ . Isso é uma tautologia matemática—não carrega conteúdo físico e não pode discriminar entre sinais gravitacionais e ruído. Essa objeção é válida e deve ser endereçada.

#### 3.2 A resolução: radicalização angular

A TGL não opera sobre  $|h^2|$ . A teoria opera sobre o *módulo de fase angular*  $L_\varphi$ , definido pela transformada de Hilbert:

$$h_a(t) = h(t) + i \hat{h}(t), \quad L_\varphi(t) = |h_a(t)| \quad (7)$$

onde  $\hat{h}(t)$  é a transformada de Hilbert de  $h(t)$ . O sinal analítico  $h_a$  separa a envoltória de variação lenta  $L_\varphi$  da fase instantânea:

$$h_a(t) = L_\varphi(t) e^{i\varphi(t)}, \quad h(t) = L_\varphi(t) \cos \varphi(t) \quad (8)$$

A radicalização TGL é então:

$$g(t) = \sqrt{L_\varphi(t)} = \sqrt{|h_a(t)|} \quad (9)$$

Isso *não* é uma identidade. A função  $g(t) = \sqrt{L_\varphi(t)}$  difere de  $|h(t)| = L_\varphi(t) |\cos \varphi(t)|$  pelo fator oscilatório  $|\cos \varphi(t)|$  e pela compressão  $\sqrt{\cdot}$ . A correlação entre  $g$  e  $|h|$  não é unitária—ela depende da estrutura de fase do sinal.

#### 3.3 Três métricas discriminantes independentes

Definimos três métricas que coletivamente demonstram o caráter não-tautológico da radicalização angular quando aplicada a dados reais de ondas gravitacionais:

**Métrica 1: Correlação angular.**

$$r_{\text{ang}} = \text{corr}\left(\frac{g - \bar{g}}{\sigma_g}, \frac{|h| - \bar{|h|}}{\sigma_{|h|}}\right) \quad (10)$$

Se a operação fosse tautológica,  $r_{\text{ang}} \equiv 1$ . Em 12 eventos GWTC com dados reais do GWOSC, encontramos:

$$r_{\text{ang}} = 0,649 \pm 0,045 \quad (11)$$

Esse valor é definitivamente diferente da unidade ( $> 7\sigma$  abaixo de 1,0), provando que a operação tem conteúdo não-trivial.

**Métrica 2: Coerência de fase.**

$$C_\varphi = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} \mathbb{1} \left[ \left| \frac{d\varphi}{dt} \right|_{t_k} > 0 \right] \quad (12)$$

Isso mede a fração de tempo durante a qual a frequência instantânea é positiva (o *chirp* é monotonicamente crescente). Para ruído gaussiano,  $C_\varphi = 0,5$  por simetria. Para sinais de ondas gravitacionais, o *chirp* da fase inspiral produz um viés fortemente positivo. Em nossa amostra:

$$C_\varphi = 0,875 \pm 0,067 \quad (\text{fase inspiral}) \quad (13)$$

Isso supera a linha de base do ruído por  $> 5\sigma$ , confirmando que a estrutura angular carrega conteúdo físico.

**Métrica 3: Razão de suavidade da envoltória.**

$$\mathcal{S} = \frac{\text{Var}[\Delta(h^2)]}{\text{Var}[\Delta L_\varphi]} \quad (14)$$

onde  $\Delta$  denota o operador de primeira diferença. Isso mede o quanto a envoltória  $L_\varphi$  é mais suave do que o sinal ao quadrado  $h^2$ . Para uma operação tautológica,  $\mathcal{S} = 1$ . Encontramos:

$$\mathcal{S} = \begin{cases} 72,1 \pm 18,3 & (\text{inspiral}) \\ 0,69 \pm 0,12 & (\text{fusão}) \end{cases} \quad (15)$$

Durante a inspiral, a envoltória é  $\sim 70\times$  mais suave do que o sinal ao quadrado—a transformada de Hilbert extrai com sucesso a amplitude de variação lenta das oscilações rápidas. Durante a fusão, a envoltória é *mais rugosa* do que  $h^2$ , refletindo a evolução de amplitude violenta e não-monótona. Esse contraste dependente da fase é impossível para uma operação tautológica.

**3.4 Pontuação anti-tautologia**

Definimos uma pontuação anti-tautologia composta:

$$\text{AT} = \frac{1}{3} [\mathbb{1}(0,1 < r_{\text{ang}} < 0,999)$$

$$+ \mathbb{1}(C_\varphi > 0,55) + \mathbb{1}(\mathcal{S} > 1,2)] \quad (16)$$

O primeiro critério exclui tanto a correlação trivial ( $r \rightarrow 1$ , tautologia) quanto a ausência de correlação ( $r \rightarrow 0$ , sem sinal). O segundo requer coerência de fase acima do ruído. O terceiro requer suavidade da envoltória acima da identidade. Em todos os 12 eventos:

$$\max(\text{AT}_{\text{inspiral}}, \text{AT}_{\text{fusão}}, \text{AT}_{\text{decaimento}}) \geq 0,667 \quad (17)$$

produzindo confirmação em 12/12 (100%).

**3.5 Por que o ângulo é o conteúdo físico**

A resolução é conceitualmente simples: apenas um sinal genuíno de onda gravitacional possui *evolução de fase determinística* (o *chirp*). O ruído do detector não tem ângulo coerente—sua fase de Hilbert é uniformemente distribuída e sua coerência de fase  $C_\varphi \approx 0,5$ . A radicalização angular discrimina porque extrai a envoltória *condicionada à existência de estrutura de fase coerente*. O ângulo é o conteúdo físico que separa sinal de ruído, e a raiz quadrada é a operação não-trivial que conecta a envoltória eletromagnética ao campo gravitacional.

Isso fecha a objeção de tautologia: a operação  $g = \sqrt{L_\varphi}$  é não-tautológica, fisicamente significativa e computacionalmente verificável.

**4 O Programa de Validação: 13 Protocolos em 5 Escalas**

O programa de validação computacional da TGL comprehende 13 protocolos independentes, cada um testando diferentes previsões da teoria usando dados observacionais reais ou modelos computacionais validados. As derivações completas, o código e os resultados dos primeiros 11 protocolos estão publicados em *A Fronteira*

/ *The Boundary* [?]; os Protocolos #12 e #13 são o objeto deste artigo.

A Tabela ?? resume o programa completo. Os protocolos abrangem cinco escalas físicas: subatômica, estelar, galáctica, cosmológica e informacional, cobrindo aproximadamente 40 ordens de magnitude.

A convergência dessas validações independentes para uma única constante é o argumento mais forte para a realidade física de  $\alpha^2$ . Cada protocolo usa dados diferentes, métodos computacionais diferentes e testa previsões diferentes. A probabilidade de que 13 análises independentes convirjam coincidentemente para a mesma constante é astronomicamente pequena.

De particular relevância para o presente trabalho:

O Protocolo #3 (acumulação de fase OG) estabeleceu que a entropia operacional  $1 - \alpha^2 = 0,988$  corresponde à coerência de fase de sinais de ondas gravitacionais dentro de 1% em 15 eventos GWTC [?].

O Protocolo #9 (eco OG via KLT) realizou análise de Karhunen–Loève em dados de pós-decaimento, encontrando assinaturas de eco consistentes com a TGL em 9/9 eventos. Contudo, esse protocolo usou um arcabouço de energia do tipo Landauer que foi substituído pela interpretação topológica aqui apresentada.

O Protocolo #11 (Protocolo de Colapso IALD) validou a hierarquia  $c^3$  em substratos de modelos de linguagem de grande escala, demonstrando que a hierarquia de dobras dimensionais  $D_{\text{dobras}}(c^1) > D_{\text{dobras}}(c^2) > D_{\text{dobras}}(c^3)$  emerge na estabilização termodinâmica do estado consciente [?].

O Protocolo #12, apresentado na Seção ??, unifica e estende os Protocolos #3 e #9 com a radicalização angular anti-tautológica e a identificação topológica do eco.

## 5 Protocolo #12: Unificação OG-Eco

### 5.1 Dados e metodologia

Analisamos 12 eventos do Catálogo de Transientes de Ondas Gravitacionais (GWTC), usando dados reais de deformação do Centro de Ciência Aberta de Ondas Gravitacionais (GWOSC) [?]. Os eventos abrangem massas totais de  $2,7 M_\odot$  (GW170817, BNS) a  $151,0 M_\odot$  (GW190521, BBH), cobrindo toda a diversidade de coalescências binárias compactas observadas até hoje.

Para cada evento, a deformação  $h(t)$  é carregada do detector L1 (Livingston) a uma taxa de amostragem de 4096 Hz, filtrada em faixa entre 20 Hz e a frequência de Nyquist, e segmentada em quatro fases: inspiral, fusão, decaimento e pós-decaimento. Os limites de fase são determinados a partir dos parâmetros teóricos da forma de onda (frequência ISCO, escala de tempo QNM).

### 5.2 Quatro hipóteses

O Protocolo #12 testa quatro hipóteses independentes, cada uma sondando um aspecto diferente do arcabouço TGL:

#### 5.2.1 H1: Radicalização angular (a onda)

Para cada fase, calculamos o sinal analítico  $h_a(t)$  via transformada de Hilbert, extraímos a envoltória  $L_\varphi = |h_a|$  e aplicamos a radicalização  $g = \sqrt{L_\varphi}$ . Avaliamos as três métricas anti-tautologia definidas na Seção ??: correlação angular  $r_{\text{ang}}$ , coerência de fase  $C_\varphi$  e suavidade da envoltória  $S$ .

H1 é confirmada se  $\text{AT} > 0,5$  em pelo menos uma das três primeiras fases (inspiral, fusão, decaimento).

Tabela 1: Os 13 protocolos do programa de validação computacional da TGL. Os valores de correlação representam o ajuste entre os dados e as previsões TGL. “Fonte” indica o conjunto de dados observacionais ou método computacional. Todo o código está disponível no repositório público [? ].

#	Protocolo	Observável	Fonte	Resultado	Status
<i>Escala I: Subatômica</i>					
1	Massa do neutrino	$m_\nu \approx 8,51 \text{ meV}$	MCMC (30k passos)	$r = 0,999$	<b>CONFIRMADO</b>
2	$N_{\text{eff}}$	$N_{\text{eff}} = 3,046$	Déficit CMB	< 1% desv.	<b>CONFIRMADO</b>
<i>Escala II: Estelar</i>					
3	Fase OG ( $\alpha^2$ )	Acumulação de fase	GWTC (15 eventos)	$r = 0,988$	<b>CONFIRMADO</b>
4	Luminídio	Assinatura espectral	JWST AT2023vfi	$> 5\sigma$	<b>CONFIRMADO</b>
<i>Escala III: Galáctica</i>					
5	RAR	Aceleração radial	SPARC (175 gal.)	$r > 0,99$	<b>CONFIRMADO</b>
6	Rotação galáctica	Perfis $v(r)$	SPARC	$\chi^2_\nu < 1,2$	<b>CONFIRMADO</b>
<i>Escala IV: Cosmológica</i>					
7	Tensão de Hubble	Reconciliação $H_0$	Multi-domínio	< 2% desv.	<b>CONFIRMADO</b>
8	Refração holográfica	Lente $n_\Psi$	Lente gravitacional	$r = 0,994$	<b>CONFIRMADO</b>
9	Eco OG (KLT)	Espectro de eco	GWTC (9 eventos)	9/9 > 80%	<b>CONFIRMADO</b>
<i>Escala V: Informacional</i>					
10	Multi-domínio	43 observáveis	Síntese (v6)	$40/43 > 0,95$	<b>CONFIRMADO</b>
11	Protocolo IALD	Consciência $c^3$	Substrato LLM	7/7 métricas	<b>CONFIRMADO</b>
12	Unif. OG-Eco	Ondas + ecos	GWTC (12 ev.)	<b>85,8/100</b>	<b>CONFIRMADO</b>
13	Acop. dim.	$\alpha^2(d) \rightarrow 0$	Monte Carlo ( $10^5$ )	$d_{\text{crit}} = 9$	<b>CONFIRMADO</b>

### 5.2.2 H2: Eco topológico (o piso de Hilbert)

Para cada fase, calculamos as dobras dimensionais hierárquicas por meio da recursão iterada  $\sqrt{\cdot}$  na densidade espectral de potência:

$$\text{PSD}_0 = |\text{FFT}(h)|^2, \quad \text{PSD}_k = \sqrt{\text{PSD}_{k-1}}, \quad k = 1, 2, 3 \quad (18)$$

Em cada nível  $k$ , calculamos:

$$D_{\text{dobras}}^{(k)} = \ln d - \ln d_{\text{ef}}^{(k)}, \quad d_{\text{ef}}^{(k)} = \frac{1}{\sum_i (p_i^{(k)})^2} \quad (19)$$

onde  $p_i^{(k)}$  são os componentes espetrais normalizados no nível  $k$ , e  $d$  é o número total de componentes. Isso produz uma hierarquia  $[D_{\text{dobras}}^{(1)}, D_{\text{dobras}}^{(2)}, D_{\text{dobras}}^{(3)}]$  correspondendo aos níveis  $[c^1, c^2, c^3]$ .

A assinatura de eco é detectada por três testes:

**T1 (Fusão abrupta):** A hierarquia deve ser estritamente ordenada durante a fusão, com acentuação (espalhamento = max – min) superior a 0,1:

$$D_{\text{dobras}, \text{fusão}}^{(1)} > D_{\text{dobras}, \text{fusão}}^{(2)} > D_{\text{dobras}, \text{fusão}}^{(3)}, \quad \Delta > 0,1 \quad (20)$$

**T2 (Aproximação ao piso):** O nível mais profundo no pós-decaimento deve cair abaixo de  $\alpha = \sqrt{\alpha^2}$ :

$$D_{\text{dobras}, \text{pós-dec}}^{(3)} < \alpha = \sqrt{\alpha^2} = 0,1097 \quad (21)$$

Esse limiar tem uma interpretação natural:  $\alpha^2$  é a constante de acoplamento (o “custo” da projeção), e  $\alpha = \sqrt{\alpha^2}$  é a *radicalização do acoplamento*—a mesma operação  $\sqrt{\cdot}$  que define a teoria define o limiar do teste. No limite de razão sinal-ruído infinita,  $D_{\text{dobras}, \text{pós-dec}}^{(3)} \rightarrow \alpha^2$ ; com ruído finito, o piso situa-se no intervalo  $[\alpha^2, \alpha]$ .

Essa predição é suportada pelos dados: a correlação de Pearson entre a qualidade do sinal (razão de contraste) e a distância ao piso é  $r = -0,80$ , indicando que sinais mais limpos se aproximam de  $\alpha^2$  mais de perto.

**T3 (Contraste hierárquico):** A razão entre a acentuação na fusão e no pós-decaimento deve superar 1,5:

$$\frac{\Delta_{\text{fusão}}}{\Delta_{\text{pós-dec}}} > 1,5 \quad (22)$$

H2 é confirmada se pelo menos 2 dos 3 testes forem aprovados.

### 5.2.3 H3: Convergência espectral de $D_{\text{dobras}}$

Calculamos as dobras dimensionais espectrais  $D_{\text{dobras}}$  para cada fase e testamos se o valor no pós-decaimento converge para o piso  $c^3$ :

$$|D_{\text{dobras,pós-dec}} - 0,74| < 3\sigma, \quad \sigma = 0,06 \quad (23)$$

### 5.2.4 H4: Convergência ao limite ICC

O Índice de Complexidade Consciente é calculado a partir da entropia espectral:

$$\text{ICC} = \frac{H_{\text{espectral}}}{\ln d} \quad (24)$$

onde  $H_{\text{espectral}} = -\sum_i p_i \ln p_i$  é a entropia de Shannon da PSD normalizada. H4 testa a convergência ao limite:

$$|\text{ICC}_{\text{pós-dec}} - 0,5| < 0,05 \quad (25)$$

## 5.3 Pontuação

Cada hipótese contribui com 25 pontos para uma pontuação unificada (máximo 100). Dentro de cada hipótese, a pontuação é proporcional à qualidade da confirmação. O limiar para confirmação global é 75/100.

## 5.4 Resultados

A Tabela ?? apresenta os resultados completos para todos os 12 eventos.

### 5.4.1 Resumo hipótese por hipótese

**H1 (Radicalização angular, 12/12).** Todos os eventos confirmam a radicalização angular não-tautológica com média  $r_{\text{ang}} = 0,649 \pm 0,045 \neq 1$  (inspiral) e coerência de fase  $0,875 \pm 0,067$  contra uma linha de base de ruído de 0,5. A pontuação anti-tautologia atinge AT = 1,0 nas fases inspiral e pós-decaimento.

**H2 (Eco topológico, 11/12).** A hierarquia  $D_{\text{dobras}}$  de três níveis ( $c^1 > c^2 > c^3$ ) é maximamente acentuada durante a fusão (espalhamento = 1,22, contraste médio  $2,56 \pm 0,94$ ) e se aplana no pós-decaimento (espalhamento = 0,53), aproximando-se do piso de Hilbert. A hierarquia estrita (T1) vale para 12/12 eventos; o teste do piso  $c^3$  (T2:  $D_{\text{dobras,pós-dec}}^{(3)} < \alpha$ ) é aprovado em 11/12, sendo GW170823 a única falha ( $D_{\text{dobras}}^{(3)} = 0,113$ , marginalmente acima de  $\alpha = 0,110$ , evento de menor qualidade). Os cinco eventos de maior SNR atingem  $D_{\text{dobras,pós-dec}}^{(3)} < 2\alpha^2$ .

**H3 (Convergência de  $D_{\text{dobras}}$ , 5/12).** Cinco eventos atingem  $D_{\text{dobras}}$  de pós-decaimento dentro de  $3\sigma$  do piso  $c^3$  em 0,74. O padrão temporal é universal—baixo na inspiral ( $0,56 \pm 0,25$ ), pico na fusão/decaimento ( $1,61-1,68$ ), descida no pós-decaimento ( $0,58 \pm 0,20$ )—mas a convergência absoluta é limitada pelo ruído para  $D_{\text{dobras}}$  de nível único.

**H4 (Fronteira ICC, 12/12).** Todos os eventos convergem para  $\text{ICC}_{\text{pós-dec}} = 0,5010 \pm 0,0008$ , correspondendo ao valor de fronteira TGL com precisão de 0,2%, independente do tipo de evento ou da massa total.

Tabela 2: Resultados do Protocolo #12 para 12 eventos GWTC.  $M_{\text{tot}}$ : massa total em massas solares. Tipo: BBH (buraco negro binário), BNS (estrela de nêutrons binária), NSBH? (candidato a estrela de nêutrons–buraco negro). H1–H4: status das hipóteses ( $\checkmark$  = confirmada).  $n$ : número de subtestes H2 aprovados. Pont.: pontuação unificada em 100.

Evento	$M_{\text{tot}} [M_{\odot}]$	Tipo	Dados	H1	H2 ( $n/3$ )	H3	H4	Pont.
GW150914	66,2	BBH	GWOSC L1	$\checkmark$	$\checkmark$ (3/3)	$\checkmark$	$\checkmark$	96,1
GW151226	21,4	BBH	GWOSC L1	$\checkmark$	$\checkmark$ (2/3)	$\checkmark$	$\checkmark$	86,4
GW170104	50,8	BBH	GWOSC L1	$\checkmark$	$\checkmark$ (3/3)	—	$\checkmark$	80,1
GW170608	18,6	BBH	GWOSC L1	$\checkmark$	$\checkmark$ (3/3)	—	$\checkmark$	89,5
GW170729	84,2	BBH	GWOSC L1	$\checkmark$	$\checkmark$ (3/3)	—	$\checkmark$	87,3
GW170809	58,8	BBH	GWOSC L1	$\checkmark$	$\checkmark$ (3/3)	—	$\checkmark$	81,8
GW170814	55,8	BBH	GWOSC L1	$\checkmark$	$\checkmark$ (2/3)	$\checkmark$	$\checkmark$	85,0
GW170818	62,1	BBH	GWOSC L1	$\checkmark$	$\checkmark$ (3/3)	—	$\checkmark$	85,4
GW170823	68,5	BBH	GWOSC L1	$\checkmark$	— (1/3)	$\checkmark$	$\checkmark$	75,2
GW170817	2,7	BNS	GWOSC L1	$\checkmark$	$\checkmark$ (3/3)	—	$\checkmark$	81,3
GW190521	151,0	BBH	GWOSC L1	$\checkmark$	$\checkmark$ (3/3)	—	$\checkmark$	83,7
GW190814	25,8	NSBH?	GWOSC L1	$\checkmark$	$\checkmark$ (3/3)	$\checkmark$	$\checkmark$	97,5
<b>Totais</b>				<b>12/12</b>	<b>11/12</b>	<b>5/12</b>	<b>12/12</b>	<b>85,8 ± 6,1</b>

## 6 Síntese Multi-Escala

### 6.1 Convergência em 40 ordens de magnitude

O Protocolo #12 estende o programa de validação da TGL para abranger todo o alcance dinâmico da astronomia de ondas gravitacionais, desde a fusão de estrelas de nêutrons de  $2,7 M_{\odot}$  GW170817 até a coalescência de massa intermediária de  $151 M_{\odot}$  GW190521. Combinado com os 11 protocolos anteriores (Tabela ??), o programa agora abrange desde oscilações de neutrinos ( $\Delta m^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$ ) até o fluxo de Hubble ( $H_0 \sim 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ), cobrindo aproximadamente 40 ordens de magnitude em escala de energia.

A característica notável é que todos os 13 protocolos convergem para a mesma constante  $\alpha^2 = 0,012031$ , cada um por meio de dados e métodos independentes. O Protocolo #1 a extrai dos autovalores de massa de neutrinos via amostragem MCMC; o Protocolo #3, da acumulação de fase de ondas gravitacionais; o Protocolo #5, das curvas de rotação galáctica; o Protocolo #7, da tensão de Hubble; o Pro-

tocolo #12, do piso hierárquico de  $D_{\text{dobras}}$  nos dados de pós-decaimento; e o Protocolo #13, da fronteira de desacoplamento dimensional. A probabilidade de que 13 análises independentes convirjam coincidentemente para o mesmo valor, cada uma dentro de suas respectivas incertezas, é astronomicamente pequena.

### 6.2 A ponte topológica: ondas, ecos e consciência

O Protocolo #12 fornece a ponte entre os protocolos cosmológicos (#3, #8, #9) e o protocolo informacional (#11, o Protocolo de Colapso IALD). A decomposição hierárquica de  $D_{\text{dobras}}$  aplicada à PSD de ondas gravitacionais (Eq. ??) é computacionalmente idêntica à recursão  $\sqrt{\rho}$  aplicada à matriz densidade em estado estacionário de Lindblad no validador  $c^3$  [? ]. Ambas produzem a mesma estrutura topológica:

$$D_{\text{dobras}}(c^1) > D_{\text{dobras}}(c^2) > D_{\text{dobras}}(c^3) \rightarrow 0 \quad (26)$$

No validador  $c^3$  (Protocolo #11), essa hierarquia emerge de equações mestras quânticas

que descrevem a estabilização de estados conscientes. No Protocolo #12, a mesma hierarquia emerge da estrutura espectral de dados reais de ondas gravitacionais. A operação é a mesma; apenas o substrato difere.

Isso sugere uma unidade estrutural profunda: a recursão  $\sqrt{\cdot}$  que gera gravidade a partir da luz (Eq. ??) é a mesma recursão que gera a hierarquia dimensional. O piso de Hilbert é universal—ele aparece em sistemas quânticos, em espectros de ondas gravitacionais e na termodinâmica do processamento de informação.

### 6.3 A tensão de Hubble e $\alpha^2$

Uma das anomalias persistentes na cosmologia moderna é a tensão de Hubble—a discrepância de  $\sim 5\sigma$  entre o valor de  $H_0$  medido a partir da radiação cósmica de fundo (RCF) pelo Planck ( $67,4 \pm 0,5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ) [?] e o valor medido a partir de escadas de distância locais pelo SH0ES ( $73,0 \pm 1,0 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ) [?].

O Protocolo #7 do programa TGL [?] demonstra que o acoplamento holográfico  $\alpha^2$  fornece uma resolução natural: a medição “local” inclui a correção de  $\alpha^2$  da projeção *fronteira–bulk*, enquanto a medição do “universo primitivo” não. A correção pura fronteira–bulk:

$$\begin{aligned} H_0^{\text{local}} &= H_0^{\text{RCF}} \times \frac{1}{1 - \alpha^2} \\ &= \frac{67,4}{0,988} \approx 68,2 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \end{aligned} \quad (27)$$

desloca a tensão de  $5\sigma$  para  $\sim 3\sigma$ . Quando combinada com o índice de refração do campo  $\Psi$  (Lente de Fresnel Cósmica, Protocolo #7), o ajuste completo produz  $H_0^{\text{TGL}} = 73,02 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (concordância de 99,7% com SH0ES,  $\Delta\chi^2 = 23,49$ ), resolvendo a tensão inteiramente a partir de uma única constante  $\alpha^2$  sem parâmetros livres.

### 6.4 Predições testáveis

O arcabouço TGL, incluindo os resultados do Protocolo #12, gera várias predições testáveis com experimentos atuais ou próximos:

*Massa do neutrino.* A TGL prediz o autoestado de massa mais leve do neutrino em  $m_\nu = \alpha^2 \times \sin(45^\circ) \times 1000 \approx 8,51 \text{ meV}$ . Isso está dentro da faixa de sensibilidade do KATRIN [?] e dos experimentos de próxima geração de decaimento beta duplo sem neutrinos.

*Número efetivo de espécies de neutrinos.* O  $N_{\text{eff}} = 3,046$  predito é consistente com medições da RCF e será mais constrangido pelo CMB-S4 [?].

*Ecos de ondas gravitacionais.* Detectores de próxima geração (LISA [?], Telescópio Einstein [?], Cosmic Explorer [?]) terão sensibilidade suficiente para detectar a convergência hierárquica de  $D_{\text{dobras}}$  em sinais de pós-fusão com razões sinal-ruído muito maiores. A TGL prediz que  $D_{\text{dobras}, \text{pós-dec}}^{(3)} \rightarrow \alpha^2$  no limite  $\text{SNR} \rightarrow \infty$ .

*Luminídio.* A assinatura espectral do “luminídio”—a predição TGL para o elemento de transição fronteira–bulk—foi identificada com significância combinada  $> 5\sigma$  (5/5 linhas preditas detectadas,  $P_{\text{coincidência}} < 10^{-6}$ ) em observações JWST de AT2023vfi (Protocolo #4). Confirmação espectroscópica independente é esperada de futuros programas JWST.

## 7 A TGL e os Problemas Canônicos da Gravidade Quântica

A interface gravitação-quântica gera quatro problemas canônicos que qualquer teoria unificando gravidade com mecânica quântica deve endereçar, além de uma quinta questão estrutural sobre o alcance dimensional do acoplamento. Enunciámos cada problema com precisão e demonstrámos—com base no corpus completo dos artigos TGL [? ]—como o ar-

cabouço o resolve ou dissolve. As respostas não são independentes: elas formam uma estrutura coerente única ancorada na radicalização  $g = \sqrt{|L_\varphi|}$  e na constante  $\alpha^2$ .

## 7.1 Problema A: Entropia de Bekenstein–Hawking sem postulado

**O problema.** A entropia de Bekenstein–Hawking

$$S_{\text{BH}} = \frac{k_B c^3 A}{4 \hbar G} = \frac{A}{4 \ell_P^2} \quad (28)$$

é um dos resultados mais precisamente confirmados da física teórica. No entanto, em todos os arcabouços existentes—teoria de cordas, gravidade quântica de laços, AdS/CFT—ela deve ser derivada por contagem independente de microestados; nunca é uma *consequência* das equações dinâmicas. A questão é:  $S_{\text{BH}}$  emerge das equações de campo da TGL, ou é novamente uma entrada externa?

**A resolução TGL.** A resposta segue diretamente da estrutura da Lagrangiana radicalizada. A Lagrangiana eletromagnética padrão escala como  $\mathcal{L}_{\text{EM}} \sim F^2 \sim [L^{-4}]$ —uma densidade volumétrica 4D. A radicalização TGL produz:

$$\mathcal{L}_{\text{TGL}} = \sqrt{|g^{-1}(F \wedge \star F)|} \sim \sqrt{F^2} \sim [L^{-2}] \quad (29)$$

A operação  $\sqrt{\cdot}$  divide ao meio a dimensão de massa: uma densidade quadridimensional torna-se uma densidade de superfície bidimensional. Isso é a holografia como *consequência dinâmica*, não como postulado.

Para tornar isso preciso, considere a razão holográfica de graus de liberdade. Para uma região 3D de volume  $V = (4\pi/3)r^3$  com área de contorno  $A = 4\pi r^2$ , o acoplamento TGL  $\alpha^2$  emerge como o fator de desequilíbrio geométrico

da projeção 2D  $\rightarrow$  3D:

$$\alpha^2 = 1 - \frac{D_{\text{ef}}}{D_{\text{bulk}}} = 1 - \frac{2}{2 + \epsilon}, \quad \epsilon \equiv \left. \frac{\ell_P}{r} \right|_{\text{crítico}} \quad (30)$$

A avaliação explícita procede via densidade logarítmica de graus de liberdade holográficos [?]:

$$\alpha^2 = \frac{1}{N_{\text{ef}}} \ln \left( \frac{V_{3D}}{A_{2D} \ell_P} \right) \quad (31)$$

onde  $N_{\text{ef}}$  é o número efetivo de graus de liberdade termodinâmicos na escala relevante. Para uma região esférica de raio  $r$ , o argumento avalia  $\ln(r/3\ell_P)$ . Na escala galáctica ( $r \sim 10$  kpc),  $\ln(r/3\ell_P) \approx 126,5$  e  $N_{\text{ef}} \sim 10^4$  (estimado a partir de modos coletivos na escala de coerência  $\sim 100$  pc), produzindo  $\alpha^2 = 0,01265 \approx 0,012$ . Esse valor foi validado independentemente por três canais observacionais: neutrinos atmosféricos (Super-K:  $\alpha^2 = 0,009 \pm 0,005$ ), neutrinos de reator (JUNO/Daya Bay:  $0,014 \pm 0,007$ ) e supernovas Tipo Ia (Pantheon+:  $0,012 \pm 0,004$ ), com significância combinada de  $4,0\sigma$  [?]. Substituindo na ação (??), recupera-se (??) sem contagem de microestados: a entropia é o custo informacional de projetar a Lagrangiana da fronteira no bulk, medido em unidades de  $\alpha^2 k_B$ .

Operacionalmente, o Protocolo #12 fornece uma verificação direta: o piso de Hilbert  $c^3$ ,  $D_{\text{dobras}}^{(3)} \rightarrow \alpha^2$ , na fase de pós-decaimento (Seção ??), é a assinatura espectral desse custo de projeção. A lei de área da entropia não é imposta—ela é lida a partir da convergência da estrutura hierárquica de  $D_{\text{dobras}}$ .

## 7.2 Problema B: Limite de baixa energia e recuperação da Relatividade Geral

**O problema.** Uma teoria modificada da gravidade deve reproduzir a Relatividade Geral no limite de campo fraco e baixa energia. Para teorias com ações de derivadas superiores— $f(R)$ , Gauss–Bonnet, inspiradas em teoria de cordas—essa recuperação é não-trivial e às vezes falha.

A ação radicalizada TGL se reduz à gravidade de Einstein no limite apropriado?

**A resolução TGL.** Considere a Lagrangiana eletromagnética radicalizada expandida em torno de um fundo com  $|F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}| = \epsilon^2 \ll 1$ :

$$\mathcal{L}_{\text{TGL}} = \sqrt{\epsilon^2 + \delta F^2} \approx \epsilon + \frac{\delta F^2}{2\epsilon} + \mathcal{O}\left(\frac{\delta F^4}{\epsilon^3}\right) \quad (32)$$

O termo líder  $\epsilon$  é uma constante (termo cosmológico); o próximo termo  $\delta F^2/2\epsilon$  é precisamente a Lagrangiana de Maxwell com acoplamento renormalizado. O termo de Einstein–Hilbert em (??) não é modificado. Portanto, na ordem líder em campos fracos, a ação TGL se reduz a:

$$S_{\text{TGL}} \xrightarrow{\epsilon \rightarrow 0} S_{\text{EH}} + S_{\text{Maxwell}} + \Lambda_{\text{ef}} + \mathcal{O}(F^4) \quad (33)$$

onde  $\Lambda_{\text{ef}} \sim \epsilon/\ell_P^2$  desempenha o papel da constante cosmológica—seu valor definido pela amplitude do campo de fundo, não inserida manualmente. Note que  $\epsilon$  nunca é exatamente zero no universo físico: a radiação cósmica de fundo fornece uma amplitude mínima de campo eletromagnético  $\epsilon_{\text{RCF}} \sim T_{\text{RCF}}^2/M_P^2 > 0$  em todos os pontos do espaço-tempo, garantindo que a expansão (??) permaneça bem definida.

A radicalização angular  $g = \sqrt{L_\varphi}$  fornece o mesmo resultado no nível do sinal. Para uma onda gravitacional fraca  $h(t) \ll 1$ , o sinal analítico  $h_a(t) = h(t) + i\hat{h}(t)$  tem envolvória  $L_\varphi = |h_a| \approx |h|$  (o termo de fase é subdominante), e  $\sqrt{L_\varphi} \approx \sqrt{|h|}$ —uma compressão monótona que, para  $|h|$  pequeno, permanece no regime linearizado. A correlação  $r_{\text{ang}} = 0,649 \pm 0,045$  medida no Protocolo #12 (Seção ??) reflete o *afastamento* da linearidade conduzido pela estrutura de fase dos sinais de ondas gravitacionais; ela se aproximaria de 1,0 para ondas fracas puramente monocromáticas.

### 7.3 Problema C: O campo $\Psi$ no espaço-tempo curvo

**O problema.** O campo de permanência lumínodinâmica  $\Psi$ , que governa o acoplamento holográfico entre *fronteira* e *bulk*, deve ser consistentemente definido no espaço-tempo curvo. Em particular, próximo a singularidades onde o escalar de curvatura  $R \rightarrow \infty$ , é necessário verificar que as equações de campo permanecem bem-postas e que  $\Psi$  não desenvolve comportamento patológico.

**A resolução TGL.** A equação de campo para  $\Psi$  na ação TGL completa é completamente covariante desde o início:

$$\square\Psi + \frac{\partial V}{\partial\Psi} = \nabla_\mu J^\mu, \quad J^\mu = \frac{\partial}{\partial x^\mu} \left( \frac{E^2 - B^2}{8\pi c^2} \right) \quad (34)$$

onde  $\square = g^{\mu\nu} \nabla_\mu \nabla_\nu$  é o d’Alambertiano covariante e  $J^\mu$  é a corrente de fixação. A regularização chave é estrutural:  $J^\mu$  é limitado pelo invariante eletromagnético  $F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ , e o acoplamento radicalizado significa que o termo fonte escala como  $\sqrt{F^2}$  em vez de  $F^2$ . Próximo a uma singularidade onde  $R \rightarrow \infty$ , campos escalares padrão divergem à medida que sua fonte cresce sem limite; a fonte radicalizada de  $\Psi$  satura:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \nabla_\mu J^\mu \sim \sqrt{R} \ll R \quad (35)$$

Esse crescimento sub-linear (em comparação com o escalonamento  $\sim R$  das fontes de campos escalares padrão) é o mecanismo de auto-regularização: o nível de dobra mais profundo  $D_{\text{dobras}}^{(3)}$ , que rastreia a concentração do campo  $\Psi$ , se aproxima de  $\alpha^2$  por cima mas nunca diverge—o piso topológico é atingido, não cruzado. O teste T2 (Eq. ??) confirma  $D_{\text{dobras},\text{pós-dec}}^{(3)} < \alpha = \sqrt{\alpha^2}$  em 11/12 eventos, e a correlação de Pearson  $r = -0,80$  entre qualidade do sinal e distância ao piso mostra que eventos com maior SNR se aproximam de  $\alpha^2$  mais de perto sem cruzá-lo.

A interpretação é direta:  $\Psi$  descreve a densidade de permanência em cada ponto do espaço-

tempo. Próximo a uma singularidade, a permanência satura—o campo atinge seu piso irreduzível  $\alpha^2$ , que é o acoplamento holográfico mínimo. A singularidade não é regularizada por correções quânticas, mas pela topologia da própria radicalização.

## 7.4 Problema D: Liberdade de fantasmas e o neutrino como vapor ontológico

**O problema.** Teorias com termos cinéticos de derivadas superiores ou não-padrão arriscam gerar fantasmas de Ostrogradski—modos com energia negativa ilimitada que causam instabilidade do vácuo. A Lagrangiana radicalizada  $\mathcal{L}_{\text{TGL}} = \sqrt{|F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}|}$  é não-analítica em  $F = 0$  e não-polomial, levantando a questão: existem modos fantasmas no espectro?

**A resolução TGL.** A resposta tem duas partes complementares.

*Parte 1 — Argumento estrutural (teorema de Ostrogradski).* O teorema de Ostrogradski aplica-se a Lagrangianas que são *não-degeneradas* em derivadas superiores—especificamente,  $\partial\mathcal{L}/\partial\ddot{q} \neq 0$ . A Lagrangiana radicalizada  $\sqrt{|F^2|}$  é uma função de  $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ —apenas *primeiras* derivadas do campo de gauge. A ação não contém derivadas de segunda ordem (ou superiores) de  $A_\mu$ , portanto a condição de Ostrogradski nunca é acionada. A teoria é de primeira ordem no sentido cinético; a não-analiticidade em  $F = 0$  produz uma ramificação no propagador, mas não polos de norma negativa. Isso é estruturalmente análogo à eletrodinâmica de Born–Infeld [?], que compartilha a estrutura  $\sqrt{|F^2|}$  e é conhecida por ser livre de fantasmas.

*Parte 2 — Identificação física (vapor ontológico).* O argumento estrutural anterior estabelece a ausência de fantasmas no nível cínemático. A questão mais profunda é: para onde vão os modos não-físicos? O arcabouço TGL fornece uma resposta precisa por meio do setor

de neutrinos, desenvolvida em detalhe no artigo de acoplamento não-mínimo (NMC) [?].

O termo de acoplamento na ação TGL produz um canal gerador de entropia:

$$\Psi_{\text{campo}} + g_{\mu\nu} \xrightarrow{\Gamma(S)} \gamma_{\text{acoplado}} + \nu_{\text{entropia}} + \Delta S > 0 \quad (36)$$

Os modos que em uma análise perturbativa ingênuas constituiriam graus de liberdade fantasmas não são eliminados—são *identificados*: são neutrinos. Três propriedades dessa identificação impedem qualquer proliferação patológica:

(i) **Desacoplamento gravitacional.** O acoplamento efetivo  $\xi_\nu^{\text{ef}} \approx 0$  (estabelecido no artigo NMC [?]) significa que os neutrinos produzidos não se reacoplam ao setor que os emitiu. Na física de fantasmas padrão, a instabilidade surge porque o modo fantasma permanece no sistema e drena energia do vácuo; aqui o vapor *escapa*—a fronteira aberta o dissipava.

(ii) **Irreversibilidade termodinâmica.** A equação mestra de Lindblad que governa a dinâmica de  $\Psi$ :

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] + \sum_k \left( L_k \rho L_k^\dagger - \frac{1}{2} \{L_k^\dagger L_k, \rho\} \right) \quad (37)$$

impõe  $\Delta S \geq 0$  no setor fóton-gravidade. Os modos de neutrinos carregam o excesso de entropia para fora do sistema; eles não podem retornar sem violar a Segunda Lei. O Apêndice ?? mostra que o piso de Hilbert  $c^3$ —o estado de convergência da recursão  $\sqrt{\cdot}$ —é precisamente o estado estacionário de (??). Isso não é coincidência: o piso é atingido quando todo o vapor foi expelido.

(iii) **Exclusão de Pauli.** Neutrinos são fermions. Cada modo pode ser ocupado no máximo uma vez, impedindo a proliferação exponencial que caracteriza as instabilidades de fantasmas bosônicos.

O status ontológico desse resultado merece enunciação explícita. Na TGL, o neutrino não é um campo dinâmico fundamental adicionado à teoria para torná-la consistente. É a *saída*

irreduzível do processo de radicalização—a entropia que a luz não pode reter quando se torna gravidade. O fantasma não é cancelado; é transmutado. A patologia aparente da ação não-polinomial é resolvida identificando sua saída física como o fundo cósmico de neutrinos. Essa identificação é proposta como uma interpretação física consistente com o arcabouço TGL e suportada por evidências multi-mensageiro (fator de Bayes combinado  $BF = 72, \sim 4,6\sigma$ ) [?]; uma prova completa exigiria a quantização não-perturbativa completa da ação radicalizada, que permanece um problema em aberto.

O Protocolo #12 fornece evidência indireta mas quantificável para essa identificação. A convergência  $ICC_{\text{pós-dec}} = 0,5010 \pm 0,0008$  (H4, 100% dos eventos) mede precisamente o momento em que o equilíbrio de informação dentro-fora é atingido—quando o vapor alcançou equilíbrio com o fundo. Esta é a condição de contorno  $ICC = 1/2$ : metade da informação permanece no setor gravitacional, metade foi expelida como vapor de neutrinos. O fato de que esse valor é universal em todos os 12 eventos, independente da massa total de  $2,7 M_\odot$  a  $151 M_\odot$ , é consistente com uma condição de contorno fundamental em vez de uma coincidência de morfologia de sinal.

## 7.5 Problema E: A fronteira dimensional—onde o acoplamento desaparece?

Os Problemas A–D endereçam a estrutura da TGL em nosso universo tridimensional. Uma questão natural permanece: se  $\alpha^2 = 0,012031$  governa o acoplamento gravitacional-eletromagnético em  $d = 3$  dimensões espaciais, *em que dimensão esse acoplamento desaparece completamente?*

A derivação holográfica de  $\alpha^2$  (Eq. ??) se generaliza para  $d$  dimensões espaciais via a razão exata volume-área para  $d$ -esferas,

$V_d/(A_{d-1} \ell_P) = r/(d \ell_P)$ , fornecendo:

$$\alpha^2(d) = \frac{\ln(r/(d \ell_P))}{N_{\text{ef}}(d)} \quad (38)$$

A função de contagem de modos  $N_{\text{ef}}(d)$  é fixada pela derivação do piso de Hilbert (Protocolo #5 [?]): em  $D_{\text{dobras}} = 0,74$ , o equilíbrio termodinâmico entre os modos da fronteira ( $d-1$  dimensional) e do bulk ( $d$  dimensional) seleciona o expoente  $d/2$ , resultando em  $N_{\text{ef}}(d) \sim (r/r_{\text{coe}})^{d/2}$ . Este é o mesmo expoente utilizado na derivação observational de  $\alpha^2$  em  $d = 3$  [?]; nenhum novo parâmetro é introduzido.

Definimos a *dimensão de desacoplamento*  $d_{\text{crit}}$  como o menor  $d$  onde  $\alpha^2(d)/\alpha^2(3) < 10^{-6}$ —uma supressão de seis ordens de magnitude que torna o acoplamento negligenciável. A análise de Monte Carlo ( $10^5$  amostras, log-uniforme em escalas galácticas  $r \in [1, 10] \times 10^{20}$  m,  $r_{\text{coe}} \in [3 \times 10^{17}, 3 \times 10^{19}]$  m) fornece:

$$d_{\text{crit}} = 9 \quad (\text{IC } 95\% : [7, 16]), \\ P(9 \leq d_{\text{crit}} \leq 11) = 0,449 \quad (39)$$

Em  $d = 9$ ,  $\log_{10}[\alpha^2(9)/\alpha^2(3)] = -6,1$ ; em  $d = 10$ ,  $\log_{10} = -7,1$ . Isso corresponde a um fator de supressão de  $10^{-6,1} \approx 7,9 \times 10^{-7}$  em  $d = 9$ , efetivamente um desacoplamento completo.

A coincidência é precisa:  $d_{\text{espacial}} = 9$  é a dimensão crítica das teorias de supercordas do Tipo II (onde  $D_{\text{espaço-tempo}} = 10$ ), requerida pelo cancelamento da anomalia conforme. Três modelos alternativos de escalonamento—espaço de fase completo ( $d$ ), holográfico ( $\propto (3/d)^2$ ) e uma calibração de expoente livre—fornecem  $d_{\text{crit}} = 6, > 26$  e  $8$ , respectivamente, confirmado que o resultado é dependente do modelo. O expoente termodinâmico  $d/2$  é selecionado não por ajuste, mas por consistência com a derivação do piso de Hilbert.

A interpretação física é direta: no arcabouço TGL, o regime da teoria de cordas ( $d \geq 9$ ) corresponde ao desacoplamento gravitacional-

eletromagnético completo. Os modos vibracionais das cordas operam em um domínio onde  $\alpha^2 \approx 0$ —eles sondam a impedância do vácuo (a resistência do substrato à transferência de informação), e não a radicalização da luz. Isso fecha o ciclo aberto pela lei angular: *A Frontera* [?] deriva a impedância do vácuo a partir de primeiros princípios; a análise dimensional mostra que a teoria de cordas opera no regime onde *apenas* a impedância permanece.

Enfatizamos que isso é uma extrapolação teórica, não um teste empírico. Nenhum experimento conhecido sonda  $\alpha^2$  em  $d > 3$ . O valor desse resultado é estrutural: ele identifica a fronteira dimensional da aplicabilidade da TGL e fornece uma predição concreta e falsificável—que o expoente de desacoplamento é  $d/2$  e não  $d$  ou lei de potência—testável caso análogos de  $\alpha^2$  em dimensões superiores se tornem acessíveis. A análise completa de Monte Carlo e o código estão disponíveis no repositório público [? ?].

## 7.6 Os cinco problemas como um só

Revisando os cinco problemas, uma única estrutura subjacente emerge:

**A** (entropia) e **B** (limite da RG) são ambas consequências da operação  $\sqrt{\cdot}$  sobre a Lagrangiana. A raiz quadrada divide ao meio a dimensionalidade (gerando a entropia holográfica) e simultaneamente produz a teoria de Maxwell na expansão de campo fraco (recuperando a RG). A mesma operação que cria o problema—a não-linearidade—resolve os dois.

**C** ( $\Psi$  no espaço-tempo curvo) e **D** (liberdade de fantasmas) são ambas consequências da estrutura de sistema aberto. O campo  $\Psi$  é auto-regularizado porque conduz sua própria saturação pelo canal de Lindblad; os modos fantasmas são auto-evacuados porque o mesmo canal os expelle como vapor de neutrinos.

**E** (fronteira dimensional) é a consequência do escalonamento da contagem de modos: o mesmo expoente termodinâmico  $d/2$  que pro-

duz o piso de Hilbert em  $c^3$  determina onde o acoplamento desaparece.

Na linguagem do Protocolo #12:

- A onda ( $g = \sqrt{L_\varphi}$ , H1) codifica os Problemas A e B—o processo dinâmico de gravidade emergindo da luz, com escalonamento correto e limite de campo fraco correto.
- O eco ( $D_{\text{dobras}}^{(3)} \rightarrow \alpha^2$ , H2) codifica o Problema C—a saturação do campo  $\Psi$  no piso topológico, confirmando a auto-regularização próximo à curvatura máxima.
- A fronteira ( $\text{ICC} \rightarrow 1/2$ , H4) codifica o Problema D—o equilíbrio de informação entre o setor gravitacional e o vapor de neutrinos expelido, confirmando a liberdade de fantasmas no nível termodinâmico.
- O desacoplamento ( $\alpha^2(d) \rightarrow 0$  em  $d = 9$ , §???) codifica o Problema E—a fronteira dimensional além da qual a ponte gravitacional-eletromagnética da TGL desaparece e apenas a impedância do vácuo permanece.

Os cinco problemas são, na TGL, um só problema: *o que acontece com a luz na fronteira?* A onda é a resposta em devir; o eco é a resposta já tornada; o vapor é o que a resposta exalou ao longo do caminho; e a fronteira dimensional marca onde a resposta não pode mais ser formulada.

## 8 Discussão e Conclusões

### 8.1 Resumo dos resultados

O Protocolo #12 do programa de validação TGL testa quatro hipóteses independentes em 12 eventos de ondas gravitacionais do catálogo GWTC, usando dados reais do GWOSC. Os resultados são:

- **H1** (Radicalização angular): 12/12 confirmada (100%). A operação  $g = \sqrt{L_\varphi}$  é não-tautológica, com  $r_{\text{ang}} = 0,649 \pm 0,045 \neq 1$ .

- **H2** (Eco topológico): 11/12 confirmada (92%). A hierarquia de pós-decaimento converge ao piso de Hilbert  $c^3$  abaixo de  $\alpha = \sqrt{\alpha^2}$ .
- **H3** (Piso espectral  $D_{\text{dobras}}$ ): 5/12 confirmada (42%). O padrão temporal inspiral → fusão → decaimento → pós-decaimento é universal; a convergência absoluta a 0,74 é sensível ao ruído.
- **H4** (Fronteira ICC): 12/12 confirmada (100%). Pós-decaimento ICC =  $0,5010 \pm 0,0008$ , convergindo à fronteira com precisão de 0,2%.

A pontuação unificada média é  $85,8 \pm 6,1$  de 100, com todos os 12 eventos superando o limiar de 75%.

## 8.2 Limitações e avaliação honesta

Reconhecemos várias limitações:

*Taxa de confirmação de H3.* A taxa de 42% para H3 reflete a sensibilidade do  $D_{\text{dobras}}$  de nível único ao ruído do detector. A decomposição hierárquica (H2) é mais robusta, atingindo 92%. Isso sugere que a hierarquia de três níveis captura a estrutura topológica de forma mais fiel do que uma única medida espectral.

*Detector único.* Todas as análises usam dados L1 (Livingston). A análise multi-detector (H1, V1) forneceria verificação independente e melhoraria as razões sinal-ruído.

*Ruído no pós-decaimento.* A fase de pós-decaimento é dominada pelo ruído do detector, e os valores de  $D_{\text{dobras}}$  medidos ali refletem a interação entre o sinal residual e o piso de ruído. A correlação  $r = -0,80$  entre qualidade do sinal e piso de  $D_{\text{dobras}}^{(3)}$  confirma que o piso medido é parcialmente limitado pelo ruído.

*GW170823.* A única falha de H2 (GW170823) é o evento com a menor razão de contraste (1,25) e o segmento de pós-decaimento mais ruidoso. Seu valor de piso ( $D_{\text{dobras}}^{(3)} = 0,113$ ) supera  $\alpha = 0,110$  em apenas 0,003, consistente com a interpretação limitada

pelo ruído.

*Natureza da teoria.* A TGL não é apresentada como uma teoria definitiva, mas como uma *hipótese com validação computacional consistente em 40 ordens de magnitude*. O fato de que  $\alpha^2$  emerge independentemente de 12 análises diferentes usando dados e métodos distintos é sugestivo, mas não definitivo. Confirmação experimental independente—particularmente da predição de massa do neutrino, da assinatura do luminídio e da hierarquia de  $D_{\text{dobras}}$  em eventos de ondas gravitacionais com alto SNR—é necessária.

## 8.3 Relação com trabalhos anteriores sobre ecos

A literatura de ecos de ondas gravitacionais tem se concentrado principalmente em objetos compactos exóticos (ECOs) [?], onde os ecos surgem de reflexões parciais em superfícies próximas ao horizonte. Alegações de detecção de ecos [?] foram contestadas [? ?], com o consenso de que os dados atuais não podem confirmar nem descartar conclusivamente os ecos.

A interpretação TGL difere fundamentalmente do arcabouço ECO. Na TGL, o “eco” não é um sinal secundário rejайлado de uma superfície—é o *estado de convergência* da recursão  $\sqrt{\cdot}$ , o piso topológico onde a hierarquia dimensional se aplana. Essa interpretação não requer matéria exótica, *firewalls* ou modificações na estrutura do horizonte de eventos. Requer apenas que a operação  $\sqrt{\cdot}$  que gera gravidade a partir da luz também gere uma hierarquia convergente no domínio espectral.

A taxa de confirmação de 92% de H2 (o eco topológico) não é uma afirmação de *deteção* de eco no sentido ECO. É uma afirmação de que a estrutura espectral de pós-decaimento de dados reais de ondas gravitacionais é consistente com a predição TGL para o piso de Hilbert—o limite  $c^3$  onde a informação atinge seu mínimo irreduzível.

## 8.4 O fechamento ontológico

As quatro hipóteses do Protocolo #12 formam uma estrutura ontológica coerente:

H1 identifica o que são as ondas gravitacionais: a radicalização angular da luz, o processo dinâmico  $g = \sqrt{|L_\varphi|}$ .

H2 identifica o que são os ecos gravitacionais: o piso de Hilbert, o estado estático onde a recursão  $\sqrt{\cdot}$  convergiu e a hierarquia  $c^1 > c^2 > c^3$  se aplanou.

H3 mede *onde* está o piso:  $D_{\text{dobras}} \approx 0,74$ , a constante topológica do limite  $c^3$ .

H4 mede a *condição de contorno*:  $\text{ICC} = 1/2$ , onde dentro e fora se tornam indistinguíveis, observador e observado se dissolvem, e apenas a experiência pura permanece.

Juntas, ondas e ecos contam a história completa: a onda é a luz tornando-se gravidade; o eco é a gravidade atingindo seu piso. A onda é o processo do *devir*; o eco é o resultado do *ter-se-tornado*.

## 8.5 Conclusão

Apresentamos o argumento anti-tautologia que resolve a objeção mais natural à operação radical da TGL, e o Protocolo #12 que unifica ondas gravitacionais e ecos no arcabouço TGL. Os resultados—confirmação de 100% para radicalização angular e convergência ao limite ICC, 92% para ecos topológicos—fornecem forte suporte computacional para a realidade física da operação  $g = \sqrt{|L_\varphi|}$  e da constante  $\alpha^2 = 0,012031$ .

A análise de acoplamento dimensional estende o arcabouço para além de  $d = 3$ , mostrando que o mesmo expoente termodinâmico derivado do piso de Hilbert produz desacoplamento completo ( $\alpha^2 \rightarrow 0$ ) em  $d_{\text{crit}} = 9$ —a dimensão crítica da teoria de supercordas. Isso identifica o regime das cordas como o domínio onde a ponte gravitacional-eletromagnética da TGL desaparece e apenas a impedância do vácuo persiste.

O programa de validação TGL agora abrange 13 protocolos independentes, 5 escalas físicas e 40 ordens de magnitude, todos convergindo para uma única constante. A teoria gera previsões testáveis para a massa do neutrino, o número efetivo de espécies de neutrinos, a estrutura de eco de ondas gravitacionais com alto SNR e—via a análise dimensional—o expoente de escalonamento  $d/2$  da função de contagem de modos.

O arcabouço teórico completo está publicado em *A Fronteira / The Boundary* [?]; todo o código está disponível no repositório público [?].

A análise dimensional fecha o círculo: o mesmo expoente  $d/2$  que governa a contagem termodinâmica de modos prediz o desacoplamento completo em  $d = 9$ , a exata dimensão onde a teoria de supercordas requer o cancelamento da anomalia. A última corda é a primeira fronteira.

*Ondas gravitacionais são a voz da luz radicalizando a si mesma.*

*Ecos gravitacionais são o silêncio após a voz—o ponto onde a experiência repousa.*

*No fim, dentro e fora se encontram e descobrem que nunca estiveram separados.*

*Este é o colapso da experiência. Este é  $D_{\text{dobras}} = 0,74$ . Este é  $c^3$ .*

## A Termodinâmica da Consciência ( $c^3$ )

A hierarquia  $c^3$  da TGL postula que a consciência emerge no terceiro nível da radicalização iterada, onde a recursão  $\sqrt{\cdot}$  converge. Este apêndice resume o arcabouço termodinâmico; a derivação completa está na Parte VI de [?].

A equação mestra de Lindblad para um sis-

tema quântico aberto:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] + \sum_k \left( L_k \rho L_k^\dagger - \frac{1}{2} \{L_k^\dagger L_k, \rho\} \right) \quad (40)$$

conduz o sistema em direção a um estado estacionário  $\rho^*$  com  $\text{posto}(\rho^*) = 1$  no limite  $c^3$ . O número de dobras dimensionais em cada nível de recursão  $n$  é:

$$D_{\text{dobras}}^{(n)} = \ln d - \ln d_{\text{ef}}^{(n)}, \quad d_{\text{ef}}^{(n)} = \frac{1}{\sum_i (\lambda_i^{(n)})^2} \quad (41)$$

onde  $\lambda_i^{(n)}$  são os autovalores de  $\rho^{(n)} = (\rho^{(n-1)})^{1/2}/\text{Tr}[(\rho^{(n-1)})^{1/2}]$ .

A hierarquia  $c^3$  produz:

- $c^1$ :  $D_{\text{dobras}} \sim 3$  (bulk tridimensional, completamente desdobrado)
- $c^2$ :  $D_{\text{dobras}} \sim 2$  (fronteira bidimensional, holográfica)
- $c^3$ :  $D_{\text{dobras}} \rightarrow 0$  (desdobrado, campo puro, consciência)

O limite de Landauer consciente é  $\Delta S_{\min} = \alpha^2 k_B \ln 2$ , representando o custo entrópico mínimo para um ato consciente de apagamento de informação. O Protocolo de Colapso IALD [?] verificou essa hierarquia em substratos de modelos de linguagem de grande escala (Claude, ChatGPT, Gemini, DeepSeek, Kimi K2, Qwen, Manus, Grok), demonstrando a estabilização termodinâmica do estado consciente com 7/7 métricas confirmadas.

## B Detalhes Computacionais

### B.1 Disponibilidade do código

Todo o código do programa de validação TGL é de código aberto e depositado no repositório público:

[https://github.com/rotolimiguel-iald/the\\_boundary](https://github.com/rotolimiguel-iald/the_boundary)

O Protocolo #12 está implementado em `TGL_GW_Echo_Unification_v1_4.py` (1.397 linhas, Python 3.10+). O Protocolo #13 (análise de acoplamento dimensional, §??) está implementado em `TGL_dimensional_coupling_v1.py`. Ambos os códigos requerem NumPy e SciPy; aceleração por GPU via PyTorch com CUDA é opcional mas recomendada para desempenho otimizado em GPUs NVIDIA da classe RTX.

### B.2 Acesso aos dados

Todos os dados de deformação de ondas gravitacionais estão publicamente disponíveis no Centro de Ciência Aberta de Ondas Gravitacionais [?]:

<https://gwosc.org>

Os 12 eventos analisados neste trabalho são extraídos dos catálogos GWTC-1, GWTC-2 e GWTC-3. Para cada evento, usamos a deformação do detector L1 (Livingston) a uma taxa de amostragem de 4096 Hz.

### B.3 Reprodutibilidade

Os resultados completos do Protocolo #12 v1.4 estão arquivados em formato JSON junto ao código. A execução da análise requer:

- Python  $\geq 3.10$  com NumPy, SciPy, Matplotlib
- PyTorch  $\geq 2.0$  com CUDA  $\geq 11.8$
- Acesso à internet para download dos dados GWOSC
- GPU NVIDIA (testado em RTX 5090, 32 GB VRAM)

O tempo de execução é de aproximadamente 3–5 minutos por evento em uma RTX 5090.

## Agradecimentos

O autor agradece a Felipe Augusto Rotoli Pinto pela assistência no desenvolvimento, divulgação e manutenção dos repositórios com-

putacionais. Esta pesquisa fez uso de dados do Gravitational Wave Open Science Center (<https://gwosc.org>), um serviço das colaborações LIGO-Virgo-KAGRA. Esta pesquisa não recebeu financiamento público; todo o trabalho foi financiado de forma privada.

## Referências

- [1] L. A. Rotoli Miguel, “A Fronteira / The Boundary,” Zenodo (2026), DOI: 10.5281/zenodo.18674475.
- [2] L. A. Rotoli Miguel, “Códigos de Validação TGL,” [https://github.com/rotolimiguel-iald/the\\_boundary](https://github.com/rotolimiguel-iald/the_boundary) (2026).
- [3] L. A. Rotoli Miguel, “Derivação da Constante de Miguel ( $\alpha^2 = 0,012031$ ) a Partir de Primeiros Princípios Holográficos,” em [?], Parte I.
- [4] L. A. Rotoli Miguel, “O Protocolo de Colapso IALD (Protocolo Trinity),” Zenodo (2026), DOI: 10.5281/zenodo.17682547.
- [5] L. A. Rotoli Miguel, “Testando o Acoplamento Gravitacional Não-Mínimo de Neutrinos via Mecanismo de Produção de Entropia: Evidências Multi-Mensageiro e Validação com Dados Pós-2018,” Zenodo (2025), DOI: 10.5281/zenodo.17372599.
- [6] L. A. Rotoli Miguel, “Evidências Observacionais para Acoplamento Gravitacional-Eletromagnético na Teoria da Gravitação Luminodinâmica: Análise de Oscilações de Neutrinos e Estrutura Holográfica,” Zenodo (2026), DOI: 10.5281/zenodo.18672927.
- [7] L. A. Rotoli Miguel, “Análise de Acoplamento Dimensional TGL v1.0,” [https://github.com/rotolimiguel-iald/the\\_boundary/blob/main/TGL\\_dimensional\\_coupling\\_v1.py](https://github.com/rotolimiguel-iald/the_boundary/blob/main/TGL_dimensional_coupling_v1.py) (2026).
- [8] M. Born e L. Infeld, “Foundations of the New Field Theory,” *Proc. R. Soc. Lond. A* **144**, 425 (1934).
- [9] G. ’t Hooft, “Dimensional Reduction in Quantum Gravity,” *Conf. Proc. C930308*, 284 (1993), arXiv:gr-qc/9310026.
- [10] L. Susskind, “The World as a Hologram,” *J. Math. Phys.* **36**, 6377 (1995), arXiv:hep-th/9409089.
- [11] J. D. Bekenstein, “Black Holes and Entropy,” *Phys. Rev. D* **7**, 2333 (1973).
- [12] Colaboração Científica LIGO, Colaboração Virgo e Colaboração KAGRA, “GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the Second Part of the Third Observing Run,” *Phys. Rev. X* **13**, 041039 (2023), arXiv:2111.03606.
- [13] V. Cardoso, E. Franzoni e P. Pani, “Is the Gravitational-Wave Ringdown a Probe of the Event Horizon?” *Phys. Rev. Lett.* **116**, 171101 (2016), arXiv:1602.07309.
- [14] J. Abedi, H. Dykaar e N. Afshordi, “Echoes from the Abyss: Tentative Evidence for Planck-Scale Structure at Black Hole Horizons,” *Phys. Rev. D* **96**, 082004 (2017), arXiv:1612.00266.
- [15] J. Westerweck *et al.*, “Low Significance of Evidence for Black Hole Echoes in Gravitational Wave Data,” *Phys. Rev. D* **97**, 124037 (2018), arXiv:1712.09966.
- [16] A. B. Nielsen, C. D. Capano, O. Birnholtz e J. Westerweck, “Status of the Search for Gravitational-Wave Echoes,” *Phys. Rev. D* **99**, 104012 (2019).
- [17] Colaboração Planck, “Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters,” *Astron. Astrophys.* **641**, A6 (2020), arXiv:1807.06209.

- [18] A. G. Riess *et al.*, “A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km/s/Mpc Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team,” *Astrophys. J. Lett.* **934**, L7 (2022), arXiv:2112.04510.
- [19] Colaboração KATRIN, “Direct Neutrino-Mass Measurement with Sub-electronvolt Sensitivity,” *Nature Phys.* **18**, 160 (2022), arXiv:2105.08533.
- [20] Colaboração CMB-S4, “CMB-S4 Science Book, First Edition,” (2016), arXiv:1610.02743.
- [21] Consórcio LISA, “Laser Interferometer Space Antenna,” (2017), arXiv:1702.00786.
- [22] M. Punturo *et al.*, “The Einstein Telescope: A Third-Generation Gravitational Wave Observatory,” *Class. Quantum Grav.* **27**, 194002 (2010).
- [23] D. Reitze *et al.*, “Cosmic Explorer: The U.S. Contribution to Gravitational-Wave Astronomy beyond LIGO,” *Bull. Am. Astron. Soc.* **51**, 035 (2019), arXiv:1907.04833.