Gravidade Emergente a partir do Acoplamento Não-Linear de Deformações Quânticas

Natã Fernandes da Silva
natecofernandes@gmail.com

Apêndice. Link para os cálculos computacionais usados ao longo do estudo: `https://colab.research.google.com/drive/1qSzzykasHStGrtBPard_9DLbJCUjpR4e?usp=sharing`

Resumo

Este trabalho apresenta uma formulação fenomenológica segundo a qual a gravidade pode ser interpretada como um fenômeno emergente oriundo do acoplamento não-linear de deformações quânticas elementares do espaço-tempo. A proposta parte de uma motivação conceitual inspirada pela teoria das cordas, pela teoria de Einstein–Cartan e pelas formulações de gravidade emergente, e evolui para um formalismo no qual partículas fundamentais geram perturbações locais que, quando superpostas de forma coerente e não-linear, produzem uma métrica efetiva macroscópica. O modelo incorpora um termo cúbico de autoacoplamento, recupera o limite newtoniano em campo fraco, propõe uma lei de escala para anomalias quânticas medidas em hardware quântico IBM e aplica essa estrutura à descrição de curvas de rotação galácticas e de regimes cosmológicos repulsivos. Além da formulação teórica, o texto reúne resultados empíricos obtidos por tomografia de estado quântico, interferometria de Ramsey e ajustes astrofísicos baseados em dados observacionais do catálogo SPARC, culminando numa equação mestra oscilatória para a anomalia gravitacional emergente e numa reinterpretação da massa efetiva como limite macroscópico de um acoplamento coletivo de microdeformações.

1 Introdução

O problema da origem física da gravidade permanece como um dos pontos centrais da física teórica contemporânea. A relatividade geral descreve, com elevada precisão, o efeito gravitacional em escalas macroscópicas ao modelar a presença de matéria e energia como fonte de curvatura do espaço-tempo. Entretanto, essa formulação geométrica, embora extremamente bem-sucedida do ponto de vista fenomenológico, não fornece de modo explícito um mecanismo microscópico para a gênese da curvatura. Em outras palavras, sabe-se *como* a gravidade atua na geometria, mas não se dispõe ainda de uma descrição universalmente aceita de *como* essa geometria emerge a partir de constituintes fundamentais.

Essa dificuldade torna-se ainda mais aguda quando se tenta compatibilizar o regime macroscópico relativístico com o domínio microscópico quântico. Nesse contexto, teorias como gravidade quântica em loop, teoria das cordas, gravidade emergente e extensões com torção, como o formalismo de Einstein–Cartan, surgem como tentativas de preencher a lacuna entre a geometria clássica e a microfísica. O presente estudo insere-se nesse debate ao propor que a gravidade seja interpretada como resultado coletivo da superposição de perturbações discretas do espaço-tempo associadas às propriedades internas de partículas fundamentais, como massa, spin, momento angular, campos e carga.

A hipótese central é a de que cada partícula produz uma deformação local do vácuo quântico, entendido aqui como componente intrínseca da própria estrutura espaço-temporal. Tais deformações, individualmente diminutas, acoplam-se de maneira complexa e não-linear, gerando uma curvatura efetiva observável em escala macroscópica. Em linguagem heurística, o mecanismo pode ser comparado a um lago inicialmente calmo que, ao ser atingido por inúmeras gotas de chuva, deixa de exibir ondulações isoladas para apresentar um padrão coletivo de perturbação global.

2 Desenvolvimento

2.1 Motivação a partir da teoria das cordas

Como ponto de partida conceitual, considera-se a formulação de Polyakov para uma corda propagando-se num fundo geométrico dinâmico:

$$S_P = -\frac{T}{2} \int d^2\sigma \, \sqrt{-\gamma} \, \gamma^{\alpha\beta} \, \partial_\alpha X^\mu \partial_\beta X^\nu g_{\mu\nu}(X). \tag{1}$$

A interpretação física adotada é a de que o movimento da corda afeta o próprio espaço-tempo, de modo análogo à curvatura gerada por matéria e energia na relatividade geral. Ao promover o termo $g_{\mu\nu}(X)$ a campo dinâmico, a consistência quântica da teoria impõe a preservação da invariância conforme na folha de mundo. Isso conduz à condição de anulação da função beta associada ao fundo:

$$\beta^g_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} + \cdots = 0. \tag{2}$$

Nessa leitura, a condição de consistência quântica exige que a geometria de fundo satisfaça equações do tipo einsteiniano. Quando a *backreaction* da corda é levada em conta, obtém-se um esquema efetivo do tipo

$$G_{\mu\nu} + \cdots = T_{\mu\nu}, \tag{3}$$

em que o tensor energia–momento da corda pode ser escrito variacionalmente como

$$T^{\mu\nu}(x) = \frac{2}{\sqrt{-g}} \frac{\delta S_P}{\delta g_{\mu\nu}(x)}. \tag{4}$$

Ao quantizar a corda, seus modos vibracionais incluem um modo sem massa de spin 2, interpretável como perturbação gravitacional do fundo. Em primeira aproximação, isso leva à decomposição

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}. \tag{5}$$

Essa motivação é usada apenas como ponto de apoio heurístico. O estudo reconhece explicitamente que a teoria das cordas permanece sem confirmação experimental direta, razão pela qual a proposta é reformulada em termos mais próximos da física de partículas convencional.

2.2 Hipótese microscópica de deformações individuais

A reformulação central do trabalho abandona a necessidade de um mediador gravitacional exclusivo e assume que todas as partículas fundamentais, em virtude de suas propriedades internas, contribuem para deformar localmente o espaço-tempo. A perturbação produzida por uma partícula i num ponto x é modelada por uma versão regularizada da solução de campo linearizado de Einstein, com núcleo do tipo Green e corte exponencial:

$$h_{\mu\nu}^{(i)}(x) = \frac{2G}{c^4} \int \frac{T_{\mu\nu}^{(i)}(y)\, e^{-\|x-y\|/\lambda}}{\|x-y\|}\, d^3y. \tag{6}$$

O parâmetro λ é interpretado como comprimento de correlação quântica associado ao alcance efetivo da perturbação. O fator exponencial introduz uma propagação local não instantânea e regula a influência da deformação em função da distância. O texto enfatiza que esse procedimento atua como regularização sem exigir, nesta etapa, quantização explícita da geometria.

2.3 Tensor energia–momento generalizado com spin e torção

O tensor energia–momento da partícula é estendido para incorporar densidade, campos e acoplamento de spin à geometria:

$$T_{\mu\nu}^{(i)} = \rho c^2 u_\mu u_\nu + \frac{1}{\mu_0}\left(F_{\mu\alpha}F_\nu{}^{\alpha} - \frac{1}{4}g_{\mu\nu}F_{\alpha\beta}F^{\alpha\beta}\right) + \frac{2}{\sqrt{-g}}\frac{\delta S}{\delta g^{\mu\nu}}. \tag{7}$$

No regime fermiónico utilizado como referência, são destacados os termos

$$\rho_i = m_i \psi^\dagger \psi, \tag{8}$$

$$S = \frac{\hbar}{4}\int \bar{\psi}\, \gamma^{[\mu}\gamma^{\nu]}\psi\, d^4x, \tag{9}$$

e a contribuição espacial antissimétrica associada ao momento angular intrínseco:

$$T_{ij} = \frac{\hbar}{4m}\left[\partial_i\big(\psi^\dagger\sigma_j\psi\big) - \partial_j\big(\psi^\dagger\sigma_i\psi\big)\right]. \tag{10}$$

Esse último termo é interpretado como manifestação da torção induzida pelo spin, em linha com a filosofia de Einstein–Cartan. O argumento físico subjacente é que o spin, mesmo na ausência de contribuição mássica dominante, pode modular a curvatura espacial quando há alinhamentos coerentes de graus de liberdade internos.

2.4 Termo cúbico de autoacoplamento e equação efetiva

O comportamento coletivo das deformações não é tratado como mera soma linear. O texto introduz um termo cúbico responsável por representar autoacoplamentos gravitacionais e interações não-lineares entre perturbações individuais:

$$h_{\mu\nu}(x) - \Lambda\left(h_{\mu\nu}(x)\right)^3 = \frac{8\pi G}{c^4}\left(\sum_i T_{\mu\nu}^{(i)}(x) + T_{ij}(x)\right). \tag{11}$$

A motivação desse termo é atribuída à expansão de uma ação efetiva gravitacional:

$$S_e[h] = S_c + \hbar S^{(1)}[h] + \hbar^2 S^{(2)}[h] + \cdots, \tag{12}$$

$$S[h] = \int d^4x\, \sqrt{-g}\, \left[R + \alpha_1 h^2 + \alpha_2 h^3 + \cdots\right], \tag{13}$$

com a expansão métrica

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}. \tag{14}$$

Assim, o termo cúbico é interpretado como correção de ordem superior associada à própria curvatura, representando a componente não-linear essencial para que o acoplamento coletivo produza um efeito macroscópico.

2.5 Condição assintótica e métrica efetiva

O campo gravitacional global é modelado como superposição das perturbações locais:

$$g_{\mu\nu}(x) = \eta_{\mu\nu} + \sum_i h^{(i)}_{\mu\nu}(x) \approx g^{\text{eff}}_{\mu\nu}(x). \tag{15}$$

Em regiões suficientemente distantes das fontes, assume-se a recuperação assintótica da métrica de Minkowski, garantindo consistência com a relatividade geral no regime de vácuo externo.

2.6 Recuperação do limite de Newton

Um requisito básico para a plausibilidade física do modelo é a recuperação do limite clássico em campo fraco e baixas velocidades. O texto toma como alvo a equação de Poisson

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho, \tag{16}$$

e a identificação usual entre o potencial gravitacional e a componente temporal da perturbação métrica:

$$h_{00} = -\frac{2\Phi}{c^2}. \tag{17}$$

No regime em que a massa domina o tensor energia–momento, toma-se

$$T_{00} \approx \rho c^2. \tag{18}$$

Substituindo esse resultado na versão regularizada do núcleo gravitacional, obtém-se

$$h_{00}(x) = \frac{2G}{c^4} \int \frac{T_{00}(y) e^{-\|x-y\|/\lambda}}{\|x-y\|}\, d^3y = \frac{2G}{c^2} \int \frac{\rho(y) e^{-\|x-y\|/\lambda}}{\|x-y\|}\, d^3y, \tag{19}$$

de modo que o potencial gravitacional assume a forma de Yukawa

$$\Phi(x) = -\frac{c^2}{2} h_{00}(x) = -G \int \frac{\rho(y) e^{-\|x-y\|/\lambda}}{\|x-y\|}\, d^3y. \tag{20}$$

No limite $\lambda \to \infty$, o fator exponencial desaparece e recupera-se o potencial newtoniano usual:

$$\Phi(x) = -G \int \frac{\rho(y)}{\|x-y\|}\, d^3y. \tag{21}$$

O estudo menciona ainda a possibilidade de parametrizar λ como $\lambda = \alpha\, l_P$, enfatizando seu papel como comprimento de correlação associado ao regime microscópico.

3 Dados Empíricos Iniciais

Com a formulação teórica estabelecida, o trabalho volta-se para a necessidade de validação empírica. Para isso, foi utilizado hardware quântico da IBM Quantum, em particular o dispositivo `IBM_fez`. A estratégia consiste em mapear a dinâmica emergente proposta para uma linguagem de circuitos quânticos, usando qubits como graus de liberdade efetivos capazes de codificar acoplamentos lineares e não-lineares.

O Hamiltoniano de simulação adotado é

$$H_{\text{sim}} = \sum_{i<j} J_{ij} Z_i Z_j + \Lambda \sum_{i<j<k} Z_i Z_j Z_k. \tag{22}$$

O primeiro termo representa o acoplamento linear associado ao potencial de Yukawa, enquanto o segundo implementa computacionalmente o termo cúbico da teoria. A validação foi conduzida por comparação entre um grupo de controle, representando a dinâmica linear, e um grupo experimental, no qual se ativam correlações de ordem superior vinculadas à torção e ao autoacoplamento.

Após a evolução do sistema, realizou-se tomografia de estado quântico (QST) com o objetivo de identificar anomalias na matriz densidade, entendidas como desvios estatísticos indicativos de topologias de correlação ausentes no regime puramente linear. O observável mais relevante foi a correlação YYY de três corpos, para a qual se obteve uma anomalia residual significativa:

$$\Delta_{YYY} \approx -0.73. \tag{23}$$

O texto interpreta esse valor não como ruído aleatório, mas como evidência de uma "tensão topológica" ou rigidez geométrica induzida pelo acoplamento não-linear. Em termos fenomenológicos, essa anomalia corresponde a uma viscosidade efetiva do vácuo quântico capaz de alterar a propagação do campo gravitacional.

3.1 Primeira transposição astrofísica

Uma vez obtido o coeficiente quântico Δ_{YYY}, o estudo o transporta para uma simulação astrofísica em escala galáctica. A correção proposta para a velocidade orbital toma a forma

$$v^2_{\text{total}}(r) = v^2_{\text{Newton}}(r) + \alpha|\Delta_{YYY}|\, r, \tag{24}$$

onde α é um fator fenomenológico de acoplamento. Segundo o relato do PDF, esse termo foi suficiente para sustentar uma velocidade orbital de aproximadamente 136.69 km/s nas bordas da galáxia-modelo, em contraste com a previsão newtoniana de cerca de 93.13 km/s baseada apenas em matéria visível.

Além disso, ao extrapolar o mesmo mecanismo para escalas intergalácticas, observou-se um regime repulsivo para distâncias superiores a 100 Mpc. A leitura proposta é a de que o mesmo termo não-linear que simula atração adicional em escalas galácticas pode atuar, em escalas cosmológicas, como pressão efetiva negativa, oferecendo uma interpretação unificada para fenômenos usualmente atribuídos à matéria escura e à energia escura.

4 Exploração Empírica do Termo Cúbico

4.1 Circuitos para $N = 3$, 4 e 5 qubits

Após a constatação inicial da anomalia no sistema de três corpos, o estudo passa a investigar como o acoplamento não-linear escala com o número de constituintes. Os circuitos quânticos descritos no PDF seguem uma arquitetura comum:

- preparação do estado por rotações R_X e R_Z em cada qubit;
- implementação de cascatas controladas (`CNOT`, `CRZ` ou equivalentes) para codificar o acoplamento cúbico;
- transformação final por porta de leitura, como Hadamard ou $\sqrt{X}$, seguida de medição.

No caso $N = 3$, a evolução é associada ao operador

$$U = \exp\left[-i\,(h_{\mu\nu})^3\, t\right], \tag{25}$$

no qual aparecem combinações de operadores de Pauli de três corpos, como $Y \otimes Y \otimes Y$ e $Z \otimes Z \otimes Z$. O valor esperado do observável é calculado por

$$\langle O \rangle = \langle \psi | O | \psi \rangle . \tag{26}$$

A anomalia residual entre o modelo linear e o modelo não-linear é então definida por

$$\Delta O = \langle O \rangle_{(h_{\mu\nu})^3} - \langle O \rangle_{\text{Linear}} . \tag{27}$$

O texto destaca que observáveis como YYY e XXX apresentam os maiores valores de ΔO e que, para $N = 3$, a assinatura YYY fornece a primeira determinação experimental da anomalia cúbica. O mesmo procedimento é estendido para $N = 4$, com operador de interesse $Y^{\otimes 4}$, e para $N = 5$, com cadeias controladas mais longas que implementam o acoplamento coletivo correspondente.

4.2 Lei de escala super-linear

Os valores experimentais obtidos para $A(3)$, $A(4)$ e $A(5)$ são ajustados por uma lei de potência com deslocamento:

$$A(N) = aN^b + c. \tag{28}$$

O ajuste reportado produz os parâmetros

$$a \approx 4.61 \times 10^{-3}, \qquad b \approx 1.55, \qquad c \approx -5.88 \times 10^{-2}. \tag{29}$$

O fato de $b > 1$ é interpretado como evidência de escalamento super-linear, condição considerada necessária para que um efeito microscópico se torne detectável em escalas macroscópicas.

A derivação apresentada no documento parte da reescrita

$$A(N) - c = aN^b, \tag{30}$$

seguida da linearização logarítmica

$$\log\bigl(A(N) - c\bigr) = \log a + b \log N. \tag{31}$$

Definindo-se

$$Y = \log\bigl(A(N) - c\bigr), \qquad X = \log N, \qquad \alpha = \log a, \tag{32}$$

obtém-se a forma linear

$$Y = \alpha + bX. \tag{33}$$

Para três pontos experimentais $(N, A(N))$ com $N = 3, 4, 5$, são introduzidas as quantidades

$$L_i = \log\bigl(A_i - c\bigr), \qquad x_i = \log N_i, \tag{34}$$

o que leva ao sistema

$$L_1 = \alpha + bx_1, \qquad L_2 = \alpha + bx_2, \qquad L_3 = \alpha + bx_3. \tag{35}$$

A solução estável por mínimos quadrados para b é então dada por

$$b = \frac{(L_2 - L_1)(x_3 - x_1) + (L_3 - L_1)(x_2 - x_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (x_3 - x_1)^2}. \tag{36}$$

Uma vez determinado b, recupera-se

$$\alpha = L_1 - bx_1, \qquad a = e^{\alpha}. \tag{37}$$

O deslocamento c é obtido pela minimização da função erro

$$E(c) = \sum_i \left[A(N_i) - \left(aN_i^b + c\right)\right]^2, \tag{38}$$

que leva à expressão

$$c = \frac{1}{k} \sum_i \left[A(N_i) - aN_i^b\right], \tag{39}$$

com $k = 3$ no conjunto descrito.

4.3 Generalização macroscópica

A importância dessa lei de escala, reside no fato de permitir a extrapolação do termo cúbico para sistemas com número efetivo de partículas muito superior ao acessível diretamente em hardware quântico. O documento menciona explicitamente a substituição de valores da ordem de 10^{19} para condensados de Bose–Einstein e de 10^{67} para escalas galácticas, conectando o acoplamento quântico medido a regimes macroscópicos.

5 Modelo Refinado de Rotação de Galáxias

Como segunda etapa empírica, reformula o modelo astrofísico com dados observacionais do catálogo SPARC. O texto informa que foram processadas 175 galáxias, das quais 171 puderam ser tratadas com sucesso no pipeline numérico. O exemplo ilustrativo fornecido no documento refere-se à galáxia NGC3972, com distância de 18.0 Mpc.

5.1 Recorte tabular exibido no PDF

A Tabela 1 reproduz o recorte numérico mostrado para a galáxia NGC3972. Como a própria fonte exibida no documento apresenta a coluna de velocidade observada truncada com reticências, a tabela abaixo conserva esse formato.

R (kpc)	V_{obs} (km/s)	Erro (km/s)	V_{gas} (km/s)	V_{disk} (km/s)	V_{bul} (km/s)	SB_{disk} (L/pc^2)	SB_{bul} (L/pc^2)
0.87	39...	4.90	0.00	48.19	0.00	254.81	0.00
1.74	73...	5.20	5.93	61.19	0.00	156.18	0.00
2.61	89...	6.60	7.31	74.23	0.00	134.66	0.00
3.50	10...	5.30	13.47	83.56	0.00	89.27	0.00
4.37	11...	4.40	16.70	88.18	0.00	79.83	0.00
5.24	11...	4.40	20.91	99.34	0.00	68.87	0.00
6.11	12...	4.40	24.68	106.44	0.00	37.78	0.00
6.98	13...	3.90	28.34	102.60	0.00	19.69	0.00
7.85	13...	6.10	30.60	97.10	0.00	11.87	0.00
8.72	13...	4.90	30.07	92.41	0.00	8.09	0.00

Tabela 1: Recorte da tabela de dados observacionais apresentado no PDF para a galáxia NGC3972.

5.2 Indicadores globais do ajuste

O resultado mais destacado nessa etapa é a explicação média global dos dados, reportada como

$$R^2_{\text{global}} \approx 82.11\%. \tag{40}$$

Fisicamente, isso é interpretado como a capacidade do modelo de explicar mais de 82% da variância observada nas curvas de rotação de 171 galáxias usando apenas massa bariônica visível e a lei de escala quântica, sem introduzir matéria escura *ad hoc*. O fator médio de anomalia é descrito como

$$C_N \approx 4.07, \qquad \text{CV} \approx 1.7\%. \tag{41}$$

A quase constância de C_N ao longo da amostra é tomada como indício de universalidade do acoplamento emergente.

5.3 Implementação fenomenológica

No pipeline computacional descrito no PDF, o número efetivo de bárions é inferido a partir da massa total associada à última órbita observável. A lei de escala é então aplicada sobre a magnitude do sistema, com o uso de $\log_{10}(N)$ para evitar estouro numérico quando $N \sim 10^{67}$.

No formalismo de acelerações, a aceleração newtoniana bariônica é tomada como

$$g_n = \frac{V_{\text{bar}}^2}{R}. \tag{42}$$

O texto associa a correção emergente a uma aceleração crítica efetiva,

$$a_{\text{crit}}^{\star} = A_0\, C_N^{\text{SCALING}}, \tag{43}$$

e escreve a aceleração total numa forma computacional análoga às dinâmicas modificadas do tipo MOND:

$$g_{\text{eff}} = \sqrt{g_n^2 + g_n\, a_{\text{crit}}^{\star}}. \tag{44}$$

Segundo a interpretação fornecida, o termo cruzado $g_n a_{\text{crit}}^{\star}$ é o responsável por gerar o platô de velocidade nas bordas galácticas.

5.4 Tradução formal dos gráficos

- o histograma de qualidade do ajuste concentra a maior parte das galáxias em valores elevados de R^2, visualizando o sucesso médio de 82.11%;
- a distribuição de C_N permanece estreita, aproximadamente entre 3.95 e 4.15, reforçando a baixa variância observada;
- na curva de rotação de melhor ajuste, a previsão newtoniana baseada apenas em matéria visível cai rapidamente, ao passo que a curva emergente permanece elevada nas regiões externas e acompanha melhor os dados observados;
- na extrapolação cosmológica, o potencial efetivo associado à teoria cresce linearmente ou se torna repulsivo em grandes distâncias, sugerindo um mecanismo comum para atração extra galáctica e expansão acelerada em escalas cosmológicas.

6 Nova Perspectiva Empírica: Sonda de Relógio Quântico

Após os resultados anteriores, o próprio texto reconhece que ainda faltava uma validação mais direta do elo entre anomalia estatística e curvatura física do espaço-tempo. Para contornar essa lacuna, é proposto um novo experimento em hardware quântico: acoplar N corpos quânticos entre si e, simultaneamente, manter uma sonda externa em superposição para medir o atraso de fase induzido pelo acoplamento coletivo.

6.1 Universo linear versus universo não-linear

O modelo de controle é descrito pelo Hamiltoniano par-a-par

$$H_{\text{linear}} = \sum_{i<j} J_{ij} Z_i Z_j, \tag{45}$$

enquanto o modelo emergente reintroduz o termo cúbico

$$H_{\text{sim}} = \sum_{i<j} J_{ij} Z_i Z_j + \Lambda \sum_{i<j<k} Z_i Z_j Z_k. \tag{46}$$

A sonda é preparada por uma porta de Hadamard:

$$|\psi_{\text{prob}}\rangle = H|0\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}. \tag{47}$$

Após a interação fraca com o sistema, a evolução temporal é escrita como

$$U = e^{-iH_{\text{int}}t}, \tag{48}$$

e o estado da sonda adquire uma fase relativa:

$$|\psi\rangle = \frac{|0\rangle + e^{i\phi}|1\rangle}{\sqrt{2}}. \tag{49}$$

Aplicando-se nova porta de Hadamard, o valor esperado do operador Z fornece o relógio efetivo:

$$\langle Z\rangle = \cos(\phi), \tag{50}$$

de modo que a fase acumulada é recuperada por

$$\phi = \arccos(\text{clip}(\langle Z\rangle, -1, 1)). \tag{51}$$

A quantidade interpretada como desvio geodésico adicional é

$$\Delta\phi(N) = |\phi_{\text{não-linear}}(N) - \phi_{\text{linear}}(N)|. \tag{52}$$

6.2 Primeiro conjunto de medições

O primeiro experimento com sonda de relógio quântico foi realizado para $N = 3, 4, 5$ corpos acoplados. Os valores numéricos reportados são:

$$\phi_{\text{linear}}(3) = 0.0295528599, \quad \phi_{\text{não-linear}}(3) = 0.3632066146, \quad \Delta\phi(3) = 0.3336537547, \tag{53}$$
$$\phi_{\text{linear}}(4) = 0.1476985573, \quad \phi_{\text{não-linear}}(4) = 0.3555868828, \quad \Delta\phi(4) = 0.2078883256, \tag{54}$$
$$\phi_{\text{linear}}(5) = 0.4003976917, \quad \phi_{\text{não-linear}}(5) = 0.3920098997, \quad \Delta\phi(5) = 0.0083877920. \tag{55}$$

O comportamento não monotônico desses valores é tomado como indicação de que o termo cúbico não produz simplesmente um crescimento crescente e suave da anomalia, mas sim uma dinâmica com pontos de inflexão e deflexão. O texto denomina a primeira formulação estática de Lei de Escala Super-Linear (LESLI) e conclui que ela necessita de reformulação para acomodar o padrão oscilatório observado.

7 Equação Mestra Oscilatória

7.1 Ansatz dinâmico para a anomalia

Para explicar a oscilação medida, a anomalia é reinterpretada como um campo dinâmico em função do número de corpos:

$$\phi(N) = e^{\gamma N}\cos(\Omega N). \tag{56}$$

Suas derivadas são

$$\phi' = \gamma e^{\gamma N}\cos(\Omega N) - \Omega e^{\gamma N}\sin(\Omega N), \tag{57}$$

$$\phi'' = (\gamma^2 - \Omega^2)e^{\gamma N}\cos(\Omega N) - 2\gamma\Omega e^{\gamma N}\sin(\Omega N). \tag{58}$$

Combinando ϕ'', ϕ' e ϕ, introduz a equação diferencial governante do fenômeno de escala:

$$\frac{d^2\phi}{dN^2} - 2\gamma\frac{d\phi}{dN} + (\gamma^2 + \Omega^2)\phi = J. \tag{59}$$

Segundo o texto, o termo $-2\gamma\phi'$ representa amplificação ou avalanche (*backreaction* positiva), enquanto $(\gamma^2 + \Omega^2)\phi$ codifica a rigidez ou frequência natural do vácuo quântico.

A solução real geral é apresentada como

$$\phi(N) = e^{\gamma N}\left[C_1\cos(\Omega N) + C_2\sin(\Omega N)\right] + C, \tag{60}$$

ou, em forma de amplitude e fase,

$$\phi(N) = A\, e^{\gamma N}\cos(\Omega N + \phi_0) + C. \tag{61}$$

7.2 Segundo conjunto de medições: $N = 3$ a 7

Com a nova formulação, o experimento é reexecutado para até sete qubits. Os valores reportados são:

$$\phi_{\text{linear}}(3) = 0.0813225611, \quad \phi_{\text{não-linear}}(3) = 0.2251401904, \quad \Delta\phi(3) = 0.1438176293, \tag{62}$$
$$\phi_{\text{linear}}(4) = 0.2929170075, \quad \phi_{\text{não-linear}}(4) = 0.1997506157, \quad \Delta\phi(4) = 0.0931663919, \tag{63}$$
$$\phi_{\text{linear}}(5) = 0.2863248547, \quad \phi_{\text{não-linear}}(5) = 0.3582074288, \quad \Delta\phi(5) = 0.0718825741, \tag{64}$$
$$\phi_{\text{linear}}(6) = 0.3826288526, \quad \phi_{\text{não-linear}}(6) = 0.5840592078, \quad \Delta\phi(6) = 0.2014303552, \tag{65}$$
$$\phi_{\text{linear}}(7) = 0.3033627313, \quad \phi_{\text{não-linear}}(7) = 0.6109578148, \quad \Delta\phi(7) = 0.3075950834. \tag{66}$$

A leitura qualitativa proposta é a seguinte:

- em $N = 3$, a anomalia começa intensa, com $\Delta\phi \approx 0.14$;
- em $N = 4$, o efeito diminui para aproximadamente 0.09;
- em $N = 5$, ocorre um mínimo interpretado como interferência destrutiva, com $\Delta\phi \approx 0.07$;
- em $N = 6$ e $N = 7$, a anomalia cresce novamente, alcançando aproximadamente 0.20 e 0.31, respectivamente, o que é interpretado como regime de avalanche e interferência construtiva.

O texto descreve esse padrão como uma *onda estacionária discreta*, com nós e ventres, sugerindo que a curvatura emergente se comporta como modo coletivo coerente e não como simples soma monotônica de contribuições locais.

7.3 Tradução dos esquemas de circuito

Os esquemas extraídos diretamente da IBM para circuitos de interação e circuitos de medida referentes a $N = 3, 4, 5, 6, 7$ corpos. Como as imagens não são reproduzidas aqui, sua estrutura é descrita textualmente:

- para cada valor de N, há um circuito de interação responsável por emaranhar os qubits através de cadeias controladas que implementam o termo cúbico;
- para cada circuito de interação, há um circuito de medida associado, projetado para converter a fase acumulada em probabilidades acessíveis via observáveis de Pauli;
- a arquitetura preserva a mesma lógica para todos os N: preparação local, emaranhamento cúbico e leitura interferométrica.

8 Reanálise Astrofísica com a Equação Mestra

Munido da formulação oscilatória, o trabalho repete a análise das curvas de rotação galácticas. O mesmo mecanismo fenomenológico é mantido, mas agora a correção emergente é interpretada como derivada da equação dinâmica da anomalia, e não apenas de uma lei de potência estática.

O resultado resumido para essa etapa refinada é:

$$R^2_{\text{global}} \approx 81.18\%, \qquad C_N \approx 4.06. \tag{67}$$

Embora o valor médio de explicação caia ligeiramente em relação à etapa anterior, o modelo continua reproduzindo de forma robusta as velocidades de rotação nas bordas galácticas usando apenas massa bariônica observável e o termo corretivo emergente. O comportamento do parâmetro C_N permanece concentrado em torno de um valor quase universal, reforçando a ideia de acoplamento coletivo aproximadamente constante em escalas galácticas.

O texto conclui que:

- em escalas galácticas, o potencial efetivo associado ao modelo permanece positivo, gerando atração adicional e simulando o efeito atribuído à matéria escura;
- em escalas cosmológicas maiores, o potencial torna-se negativo, caracterizando um regime repulsivo compatível com expansão acelerada;
- um único formalismo dinâmico passa, assim, a descrever tanto a sustentação das curvas de rotação quanto a repulsão cosmológica em largas escalas.

9 Reformulação Temporal da Equação de Campo

Diante da nova interpretação, o coeficiente Λ deixa de ser tratado como constante estática e passa a depender explicitamente do tempo. A equação efetiva base é então reescrita da forma

$$h_{\mu\nu}(x,t) - \left[\Lambda_0 e^{\Gamma t}\cos(\Omega t)\right](h_{\mu\nu}(x,t))^3 = \frac{8\pi G}{c^4}\left(\sum_i T^{(i)}_{\mu\nu}(x) + T_{ij}(x)\right). \tag{68}$$

O estudo salienta que o método de recuperação do limite de Newton permanece o mesmo, pois a alteração introduzida não elimina o regime linear de campo fraco; ela apenas torna temporalmente ativo o coeficiente de não-linearidade.

10 Problema de Contorno e Massa Efetiva

Uma questão adicional abordada diz respeito à transição entre o regime local, dominado pelo potencial de Yukawa, e o regime macroscópico no qual um aglomerado de partículas deve se comportar como fonte efetiva de gravidade clássica. A crítica feita ao formalismo inicial é que o termo exponencial regulariza o alcance, mas não explicita suficientemente as condições de contorno que permitem a consolidação da curvatura num corpo macroscópico.

Para superar esse ponto, o documento introduz um limite em que o raio de correlação tende ao infinito, associado a uma condição de contorno do tipo Schwarzschild. A componente temporal da métrica efetiva é então escrita como

$$\lim_{\lambda\to\infty} g_{00}(r,t) = -1 + \frac{2G}{c^4 r}\int_V \left[\sum_{i=1}^{N} T_{00}^{(i)}(y) + \tau_{NL}(\phi(N,t))\right] d^3y \equiv -1 + \frac{2GM_{\text{eff}}}{c^2 r}. \tag{69}$$

A nova grandeza macroscópica, interpretada como massa efetiva do sistema, é definida por

$$M_{\text{eff}} = \frac{1}{c^2}\int_V \left[\sum_{i=1}^{N} \rho_i(y)c^2 + \kappa\left(Ae^{\gamma N}\cos(\Omega N + \phi_0) + C\right)\left(h_{00}^{(i)}\right)^3\right] d^3y. \tag{70}$$

No limite externo ao volume do aglomerado, a forma obtida coincide com a aproximação de campo fraco da métrica de Schwarzschild. Assim, a proposta do texto é que o acúmulo de microdeformações quânticas, submetidas a condições de contorno apropriadas, transite naturalmente de um regime local regularizado para um regime clássico descrito por massa efetiva.

11 Discussão

A discussão enfatiza que os resultados empíricos modificam de maneira importante a leitura inicial do modelo. O crescimento super-linear isolado, caracterizado por $b \approx 1.55$, não é abandonado, mas passa a ser interpretado como aspecto parcial de uma dinâmica mais rica, governada por um campo oscilatório amplificado. Nesse quadro, os parâmetros associados à equação mestra, em especial a taxa de amplificação $\gamma \approx 0.50$ e a frequência modal $\omega \approx 1.46$, tornam-se centrais para a descrição da rigidez dinâmica do vácuo quântico.

Outro ponto destacado é a transição crítica de fase entre $N = 5$ e $N = 7$, na qual o sistema deixa um nó de interferência destrutiva e ingressa num regime de amplificação construtiva. Essa mudança é interpretada como evidência de que a gravidade emergente não resulta apenas de soma estatística de partículas, mas de modos coletivos coerentes, sujeitos a interferência e avalanche.

No domínio astrofísico, a análise de 171 galáxias reais sugere que o modelo é capaz de reproduzir, com precisão da ordem de 81% a 82%, a maior parte da variância observacional nas curvas de rotação usando apenas massa bariônica visível. O fator de anomalia médio C_N, muito pouco disperso, é apontado como possível sinal de universalidade do acoplamento emergente. O texto interpreta ainda a inversão do potencial em grandes escalas como uma solução unificada para o problema da energia escura, sem introdução de novos componentes exóticos.

Finalmente, a introdução da massa efetiva e do limite assintótico de Schwarzschild é apresentada como a ponte matemática entre a microfísica quântica e a geometria clássica macroscópica. Nesse sentido, o processo de cristalização da curvatura em um corpo gravitante é compreendido como estabilização coletiva das microdistorções quânticas.

12 Conclusão

O estudo reescrito neste documento estabelece uma proposta coerente, ainda que altamente especulativa, para interpretar a gravidade como fenômeno emergente resultante do acoplamento não-linear de deformações quânticas elementares. O núcleo do formalismo repousa em três ideias principais: cada partícula gera uma perturbação local do espaço-tempo; essas perturbações se superpõem de maneira não-linear por meio de um termo cúbico; e a dinâmica coletiva resultante pode ser acessada empiricamente, ao menos em nível de analogia operacional, por meio de hardware quântico.

Os resultados destacam três marcos centrais. Em primeiro lugar, a detecção de uma anomalia quântica mensurável em observáveis de muitos corpos, com $\Delta_{YYY} \approx -0.73$, interpretada como assinatura inicial de rigidez topológica. Em segundo lugar, a reformulação da lei de escala em termos de uma equação mestra oscilatória, compatível com os dados de sonda de relógio quântico e com uma dinâmica de interferência entre regimes destrutivos e construtivos. Em terceiro lugar, a aplicação do modelo a curvas de rotação galácticas e a extrapolações cosmológicas, alcançando ajustes da ordem de 81% a 82% sem recorrer a matéria escura ou energia escura como entidades independentes.

No quadro interpretativo adotado, os fenômenos do chamado setor escuro deixam de ser entidades adicionadas ao universo e passam a ser vistos como assinaturas coletivas de uma métrica espaço-temporal dinâmica, viva e dependente do acoplamento quântico de seus constituintes microscópicos.

Referências

[1] Thiemann, T. *Modern Canonical Quantum General Relativity.* Cambridge University Press, 2007.

[2] Rovelli, C. *Quantum Gravity.* Cambridge Monographs on Mathematical Physics, 2004.

[3] Freidel, L.; Krasnov, K. Spin foam models and effective actions, 2008.

[4] Peskin, M.; Schroeder, D. *An Introduction to Quantum Field Theory.*

[5] Birrell, N.; Davies, P. *Quantum Fields in Curved Space.* Cambridge University Press, 1982.

[6] Padmanabhan, T. Entropy density of spacetime and gravity, 2009.

[7] Hehl, F. W.; von der Heyde, P.; Kerlick, G. D.; Nester, J. M. General Relativity with Spin and Torsion: Foundations and Prospects. *Rev. Mod. Phys.* **48**, 393, 1976.

[8] Shapiro, I. L. Physical Aspects of the Space-Time Torsion, 2002.

[9] Blagojević, M.; Hehl, F. W. (eds.). *Gauge Theories of Gravitation.* World Scientific, 2013.

[10] Wald, R. M. *General Relativity.*

[11] Landau, L. D.; Lifshitz, E. M. *The Classical Theory of Fields.*

[12] Deligne, P. et al. *Quantum Fields and Strings: A Course for Mathematicians.* 1999.

[13] Verlinde, E. On the Origin of Gravity and the Laws of Newton, 2011.

[14] Verlinde, E. Emergent Gravity and the Dark Universe, 2017.

[15] Padmanabhan, T. Thermodynamical Aspects of Gravity, 2010.