

Um Novo Modelo Cosmológico: Inflação Impulsionada por Radiação com Horizontes Causais Locais e Redistribuição de Energia por Desvio para o Vermelho

Proponho um modelo cosmológico no qual a era inflacionária é impulsionada pela pressão de radiação em vez de um campo escalar de inflaton. Começando com uma expansão linear na era de Planck, o universo transita para uma inflação exponencial em $t \approx 10^{22} t_P$ à medida que o espaço-tempo se estende além dos horizontes causais, redefinindo a velocidade da luz (c) como um parâmetro localmente invariante. Hypothesizes-se que a energia perdida pelo desvio para o vermelho dos fótons é redistribuída na pressão de radiação, alimentando assim a inflação e garantindo a conservação de energia em um universo em expansão. Regiões locais de Minkowski preservam a invariância de c , abordando os problemas do horizonte e da planicidade, enquanto reconciliam a relatividade especial com a recessão superluminal cosmológica. Oito testes observacionais são delineados, com assinaturas esperadas no CMB, ondas gravitacionais e estruturas em grande escala. Os dados atuais estão alinhados com Λ CDM, mas não excluem este modelo, deixando um caminho aberto para validação com experimentos futuros de alta precisão.

1. Introdução

A cosmologia padrão Λ CDM descreve um Big Bang quente em $t = 0$, seguido por um breve período inflacionário de $t \approx 10^{-36}$ s a 10^{-34} s. Esta era é impulsionada por um campo escalar “inflaton”, cujo potencial produz uma expansão exponencial ($a(t) \propto e^{Ht}$) [1, 2]. Isso resolve os problemas do horizonte e da planicidade e deixa impressões no fundo cósmico de micro-ondas (CMB). Apesar de seu sucesso, Λ CDM depende de ingredientes especulativos: uma partícula inflaton não detectada, paisagens potenciais finamente ajustadas e uma tolerância à aparente não conservação de energia devido ao desvio para o vermelho dos fótons.

Introduzo uma alternativa impulsionada por radiação. Meu modelo começa com uma expansão linear, transita naturalmente para uma inflação exponencial quando os fótons dominam e os horizontes se desconectam, e continua na era acelerada moderna. Três princípios centrais distinguem este quadro:

1. **Nenhum inflaton necessário.** A própria pressão de radiação, impulsionada pela energia de desvio para o vermelho, conduz a inflação.
2. **Conservação de energia restaurada.** A energia perdida pelo desvio para o vermelho é reciclada termodinamicamente na pressão de radiação, realizando trabalho no universo em expansão.

3. **Invariância local de c .** Dentro de cada região causal, os observadores medem a mesma velocidade da luz, consistente com os postulados de Einstein. Globalmente, a recessão superluminal surge naturalmente da desconexão causal.

2. Quadro Teórico

2.1 Expansão Linear Inicial ($t = 0$ a $t = 10^{20} t_P$)

Na era de Planck ($t = 1 t_P = 5.39 \times 10^{-44}$ s), o universo se expande linearmente com um fator de escala $a(t) \propto t$. Seu tamanho próprio é $R(t) = ct$, e a densidade de energia está na escala de Planck:

$$\rho \approx 5 \times 10^{96} \text{ kg m}^{-3}.$$

A equação de Friedmann governa a expansão:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2},$$

com $H = 1/t$ e curvatura insignificante. Nesta fase, os fótons estão ausentes, então a pressão de radiação ainda não contribui.

2.2 Início da Pressão de Radiação ($t = 10^{20} t_P$)

Em $t \sim 10^{20} t_P$ ($\sim 10^{-36}$ s), a formação de partículas produz fótons em um plasma de quarks-glúons a $T \approx 10^{28}$ K. A pressão de radiação surge:

$$P = \frac{1}{3}\rho c^2, \quad \rho = \frac{aT^4}{c^2},$$

com $a = 7.566 \times 10^{-16} \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-4}$. Isso resulta em $P \sim 10^{92}$ Pa. Embora enorme, a gravidade ainda domina, e a expansão permanece desacelerada.

2.3 Desconexão Causal e Invariância Local de c ($t = 10^{22} t_P$)

Em $t \approx 10^{22} t_P$ ($\sim 10^{-34}$ s), o raio do universo excede seu horizonte tipo Schwarzschild:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad M = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi R^3, \quad R = ct.$$

Quando o horizonte de partículas $d_p \approx ct$ ultrapassa r_s , as regiões se desconectam causalmente.

Dentro de cada região de horizonte, os observadores medem $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, consistente com os experimentos mentais de Einstein de trem e foguete. No entanto, globalmente, as velocidades de recessão excedem c , como na cosmologia padrão. Eu parametrizo isso como:

$$c_{\text{eff}} = c_0 \left(\frac{a_0}{a} \right)^\beta, \quad \beta > 0,$$

não implicando uma variação literal de c , mas codificando sua localidade. Assim, c permanece invariante para qualquer observador dentro de seu horizonte causal, enquanto a expansão superluminal global reflete a desconexão, não uma violação da relatividade.

2.4 Redistribuição de Energia por Desvio para o Vermelho

Em Λ CDM, a energia dos fótons diminui à medida que os comprimentos de onda se esticam:

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad \lambda \propto a, \quad E \propto a^{-1}.$$

A aparente perda de energia é atribuída à expansão, sem uma lei de conservação global.

Meu modelo resolve esse paradoxo: a energia perdida pelo desvio para o vermelho é absorvida nos horizontes causais e redistribuída na pressão de radiação, realizando efetivamente trabalho na métrica:

$$\Delta E_{\text{desvio para o vermelho}} \rightarrow \Delta P_{\text{radiação}} \cdot V.$$

2.4.1 Desvio para o Vermelho como Trabalho na Métrica

O princípio de equivalência de Einstein identifica a gravidade com a aceleração. Isso fornece uma maneira concreta de ver o desvio para o vermelho não como destruição de energia, mas como sua conversão em trabalho cinético.

Experimento Mental: Considere um laser azul disparado para cima a partir da superfície de um planeta. Os fótons saem do potencial gravitacional e chegam a um observador distante com desvio para o vermelho. Para o observador, cada fóton parece carregar menos energia. No entanto, o laser na fonte experimentou a massa-energia total dos fótons emitidos: ele transferiu momento consistente com sua energia sem desvio e pressão de radiação.

Para onde foi a energia “perdida”? Ela foi investida no campo gravitacional, realizando o trabalho necessário para elevar os fótons para fora do poço potencial.

Por analogia, na cosmologia, fótons emitidos em tempos iniciais perdem energia por desvio para o vermelho cosmológico. Localmente, a região emissora experimenta sua pressão de radiação completa. Mas globalmente, o déficit aparente não é perdido; ele foi convertido em **trabalho na métrica** – especificamente, em expansão acelerada.

$$\Delta E_{\text{foton}} = W_{\text{expansão}}.$$

2.4.2 Termodinâmica do Horizonte e Mecanismo de Redistribuição

Com base nesta analogia, proponho que os horizontes causais atuam como mediadores da energia de desvio para o vermelho:

- Transferência de Energia.** A energia dos fótons diminui como $E \propto a^{-1}$. Em vez de desaparecer, essa energia é absorvida nos horizontes de partículas ou limites causais tipo Schwarzschild.
- Mapeamento do Desvio para o Vermelho Gravitacional.** Assim como o desvio para o vermelho gravitacional transfere energia para o campo, o desvio para o vermelho cosmológico transfere energia para a expansão da métrica.
- Termodinâmica do Horizonte.** Os horizontes possuem entropia ($S \propto A/4$) e temperatura (Gibbons–Hawking). A energia desviada para o vermelho contribui para a entropia do horizonte e, por meio do quadro termodinâmico de gravidade de Padmanabhan [3], reaparece como pressão que realiza trabalho na expansão.
- Aumento da Pressão.**

$$P = \frac{1}{3} \rho c_{\text{eff}}^2 + \Delta P_{\text{desvio para o vermelho}},$$

modificando a equação de aceleração:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3P}{c^2} \right).$$

Com $\Delta P_{\text{desvio para o vermelho}} > 0$, a expansão acelera sem invocar um inflaton.

2.4.3 Considerações Formais

Formalizar este mecanismo requer:

- Teoria de campos quânticos em espaço-tempo curvo para descrever interações fóton-horizonte.
- Termodinâmica do horizonte (gravidade emergente de Padmanabhan, entropia de Bekenstein–Hawking) para modelar a absorção e reemissão de energia.
- Simulações numéricas da dinâmica de Friedmann modificada com $\Delta P_{\text{desvio para o vermelho}}$.

2.5 Era Moderna

Em $t \approx 2.6 \times 10^{71} t_P$ (13,8 bilhões de anos), a temperatura do CMB é $T = 2.7 \text{ K}$, e a pressão de radiação diminuiu para $P \sim 10^{-31} \text{ Pa}$. No entanto, o mesmo mecanismo mediado por horizontes persiste: a energia de desvio para o vermelho continua a alimentar a aceleração cósmica, contribuindo para a dinâmica de tempo tardio geralmente atribuída à energia escura ($\Omega_\Lambda \approx 0.7$).

3. Avanços Conceituais

- Nenhum inflaton necessário.** A inflação surge naturalmente da pressão de radiação intensificada pela energia de desvio para o vermelho, eliminando a necessidade de um campo escalar não detectado.
- Conservação de energia restaurada.** A energia de desvio para o vermelho é reciclada na pressão de radiação, alinhando a expansão com princípios termodinâmicos.

3. **Invariância local de c .** O postulado de Einstein é válido dentro de regiões causais, enquanto a recessão superluminal é explicada pela separação de horizontes.

4. Testes Observacionais e Assinaturas Esperadas

Proponho oito testes observacionais, cada um com assinaturas distintas que podem diferenciar este modelo do Λ CDM.

4.1 Anisotropias do CMB

- **Teste:** Medir o espectro de potência do CMB e a polarização do modo B com alta precisão.
- **Assinatura Esperada:** Flutuações em pequena escala intensificadas em multipolos $l > 1000$, junto com polarização do modo B detectável em $l < 100$ ($r \approx 0.05\text{--}0.1$).

4.2 Densidade de Energia de Radiação Dependente do Desvio para o Vermelho

- **Teste:** Observar a escalagem da densidade de energia de radiação $\rho_{\text{radiação}}$ com o desvio para o vermelho.
- **Assinatura Esperada:** Em $z > 1100$, $\rho_{\text{radiação}}$ deve desviar da escalagem padrão $\propto a^{-4}$.

4.3 Fundo de Ondas Gravitacionais (GWB)

- **Teste:** Buscar um GWB estocástico da era inflacionária.
- **Assinatura Esperada:** Um pico em $\sim 10^{-9} \text{ Hz}$, com deformação característica $h_c \approx 10^{-15}$.

4.4 Tensão de Hubble e Aceleração de Tempo Tardio

- **Teste:** Medir a constante de Hubble H_0 e a equação de estado da energia escura w .
- **Assinatura Esperada:** $H_0 \approx 70 \text{ km/s/Mpc}$, com w entre -0.8 e 0 em $z < 1$.

4.5 Estrutura em Escala de Horizonte

- **Teste:** Mapear a estrutura em grande escala em 10–100 Mpc.
- **Assinatura Esperada:** Agrupamento intensificado e vazios anormalmente grandes.

4.6 Deslocamentos de Linhas Espectrais

- **Teste:** Analisar espectros de alto desvio para o vermelho.
- **Assinatura Esperada:** Alargamento ou deslocamentos de energia de 0.1–1% em $z > 5$.

4.7 Assinaturas Termodinâmicas do Horizonte

- **Teste:** Investigar entropia e fluxo em horizontes cósmicos.

- **Assinatura Esperada:** Crescimento da entropia do horizonte $\Delta S \sim 10^{120} k_B$.

4.8 Nucleossíntese Primordial

- **Teste:** Medir a abundância de elementos leves.
- **Assinatura Esperada:** Aumento de 1–5% em ^4He e diminuição no deutério.

5. Comparação com ΛCDM

Característica	ΛCDM	Modelo Impulsionado por Radiação
Motor da Inflação	Campo inflaton escalar	Pressão de radiação + energia de desvio para o vermelho
Conservação de Energia	Não definida globalmente	Imposta termodinamicamente via horizontes
Velocidade da Luz	Invariante globalmente	Invariante localmente dentro de horizontes
Problemas de Horizonte/Planicidade	Resolvidos pelo inflaton	Resolvidos por radiação + horizontes
Energia Escura	Constante cosmológica (Λ)	Continuação do mecanismo de desvio para o vermelho-radiação
Previsões do CMB	Espectro padrão	Melhorias em pequena escala, possíveis diferenças no modo B
Tensão de Hubble	Não resolvida	H_0 intermediário natural
Status Observacional	Suportado, mas incompleto	Consistente com dados, ainda não falsificado

6. Discussão

Este quadro reformula a inflação como um processo termodinâmico intrínseco à radiação, sem a necessidade de um inflaton especulativo. Ele fornece um mecanismo para a conservação de energia em espaço-tempo em expansão e reconcilia os postulados locais da relatividade com horizontes cosmológicos.

Desafios permanecem. A dinâmica exata da redistribuição de energia por desvio para o vermelho requer maior desenvolvimento matemático, e simulações numéricas das equações de Friedmann modificadas são essenciais. A discriminação observational dependerá de missões futuras (CMB-S4, Euclid, LISA, SKA).

7. Conclusão

Apresento uma cosmologia na qual a pressão de radiação, modulada por horizontes causais e energia de desvio para o vermelho, impulsiona tanto a inflação quanto a expansão atual. Este modelo elimina a necessidade de um inflaton hipotético, restaura a consistência termodinâmica e reconcilia a invariância local de c de Einstein com a superluminalidade cosmológica. Os dados atuais são compatíveis com ΛCDM , mas os testes observacionais propostos oferecem um caminho para validação ou falsificação.

Referências

- [1] Planck Collaboration, *Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters*, Astron. Astrophys. 641, A6 (2020). [2] Guth, A. H., *Inflationary Universe*, Phys. Rev. D 23, 347 (1981). [3] Padmanabhan, T., *Thermodynamical Aspects of Gravity: New Insights*, Rep. Prog. Phys. 73, 046901 (2010). [4] BICEP2/Keck Collaboration, *Improved Constraints on Primordial Gravitational Waves*, Phys. Rev. Lett. 121, 221301 (2018).