Inflação cósmica

por: Gustavo H. Santos (gusstavoh@gmail.com)

O modelo cosmológico padrão (ΛCDM) é insuficiente para explicar todas as observações que temos sobre o universo. Vejamos alguns desses problemas.

O Problema do Horizonte

Uma das observações mais marcantes sobre o CMB é a incrível homogeneidade da radiação. O universo inteiro estava termalizado a ~ 3000 K quando tinha apenas 380.000 anos. Isso inclui regiões cuja distância era maior que o horizonte de partículas da época ($\sim 10^6$ anos-luz). Como essas regiões estavam em equilíbrio térmico se não estavam em contato causal?
Esta pergunta constitui o problema do horizonte.

Vamos analisar o problema usando coordenadas conformes. Definimos o tempo conforme η como

$$d\eta = \frac{dt}{a(t)}$$

e, com isso, a métrica FLRW se torna (com $c=1$)

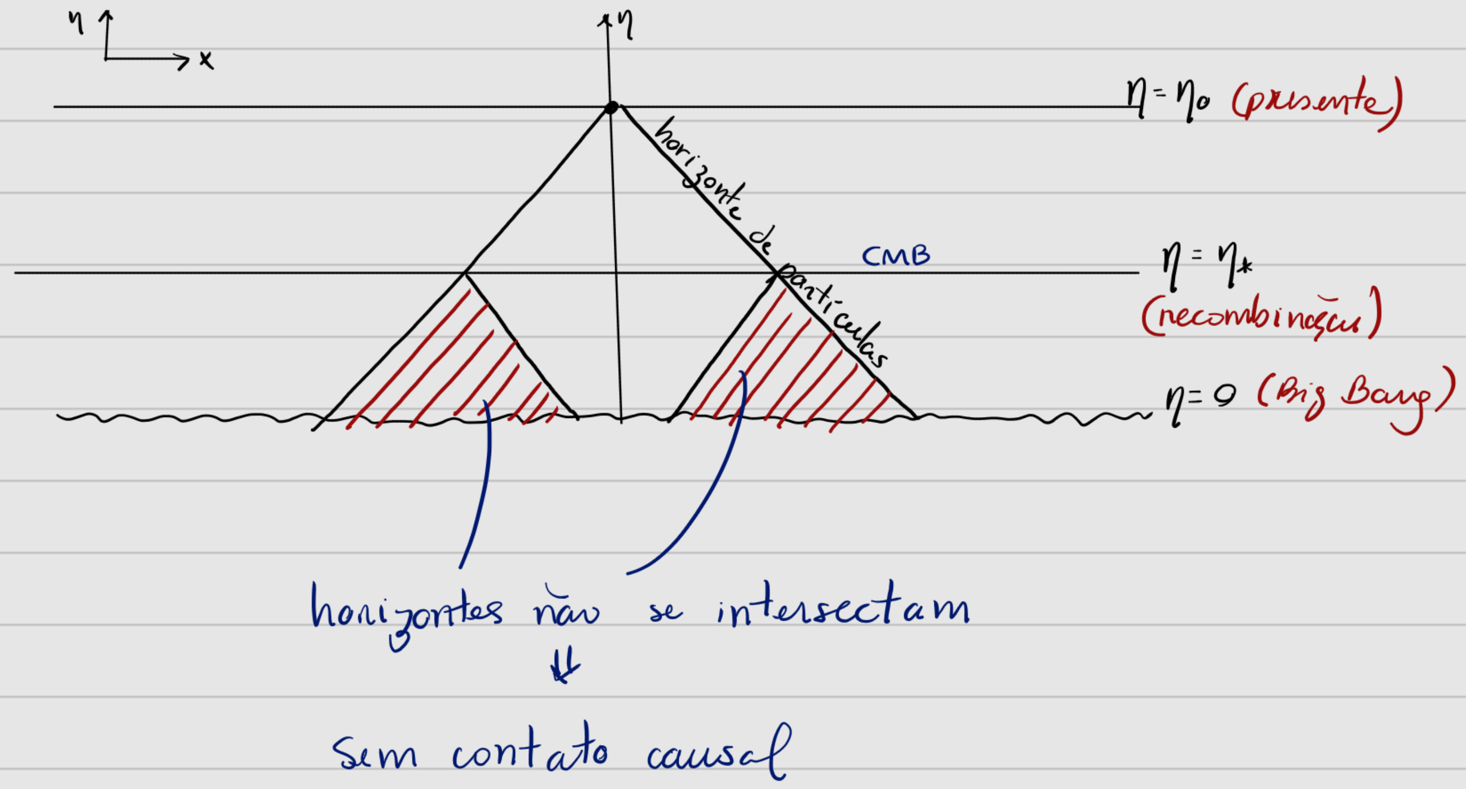
$$ds^2 = a(t)\left[\underbrace{d\eta^2}_{\text{tempo conforme}} + \underbrace{dl^2}_{\text{parte espacial}}\right]$$

Nessas coordenadas, geodésicas tipo-luz são linhas retas e a distância entre dois pontos é a diferença em tempo conforme $\Delta\eta$.

Definimos o Horizonte de Hubble comóvel como

$$d_h(t) = \frac{1}{aH}$$

Para um observador no presente, temos:



Em outras palavras, duas regiões distantes do universo não tiveram tempo para termalizar desde o Big Bang. Por quê, então, o universo é tão homogêneo?

O Problema da Planicidade

Segundo as observações mais atuais, nosso universo aparenta ser extremamente plano. Vimos previamente que um universo que inicia aberto (ou fechado), torna-se rapidamente mais aberto (ou fechado), e isso implica que nosso universo sempre foi plano.

Lembrando do parâmetro $\Omega_0 = \rho/\rho_{crit}$ (que deve valer 1 para um universo plano), vamos definir o parâmetro de curvatura dependente do tempo, dado por

$$\Omega_k(t) = \frac{\rho_{crit} - \rho}{\rho} = \frac{(a_0 H_0)^2}{(aH)^2} \Omega_{k,0}$$

Quanto mais próximo de zero, mais plano

As observações do CMB impõem um limite superior para $\Omega_k(t)$:

$$|\Omega_{k,0}| < 0.005$$

Na transição para a era da matéria, tínhamos

$$|\Omega_k(t_{eq})| < 10^{-6}$$

e, antes disso,

$$|\Omega_k(t_{BBN})| < 10^{-16}$$ Big Bang Nucleosynthesis

$$|\Omega_k(t_{EW})| < 10^{-30}$$ transição de fase eletrofraca

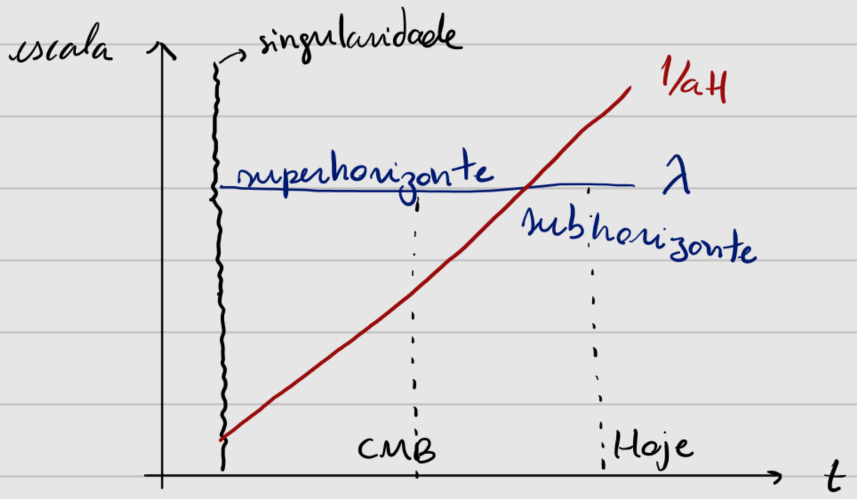
Logo, o universo possui uma estrutura finamente ajustada para a planicidade. É possível relacionar a curvatura espacial de uma região à soma das energias potencial e cinética daquela região. Assim, o problema da planicidade pode ser visto como o problema de ajuste das velocidades iniciais de todas as partículas sobre distâncias sem contato causal.

Correlações de Super-horizonte

Ambos os problemas previamente citados poderiam ser respondidos com uma hipótese relativamente simples: a de que o universo já nasceu homogêneo e plano (ou invocando o princípio antrópico, por exemplo). Entretanto, o universo está preenchido por flutuações (anisotropias), e estas flutuações apresentam correlações estatísticas mesmo sobre distâncias acausais. Estas observações demandam uma explicação dinâmica.

Segundo David Tong:

"Estas correlações tornam mais difícil apelar para um criador sem soar como um jovem criacionista, argumentando que registros fósseis foram plantados para nos enganar."



Flutuações da estrutura de larga escala com comprimento de onda λ já estiveram fora do horizonte de Hubble comóvel $(1/aH)$ no passado. Ou seja, eram causalmente desconectadas.
(Em coordenadas comóveis, λ é constante e o horizonte aumenta).

Resumindo: nosso universo é inexplicavelmente plano e homogêneo, e apresenta correlações em suas flutuações, tudo isso sobre distâncias acausais.

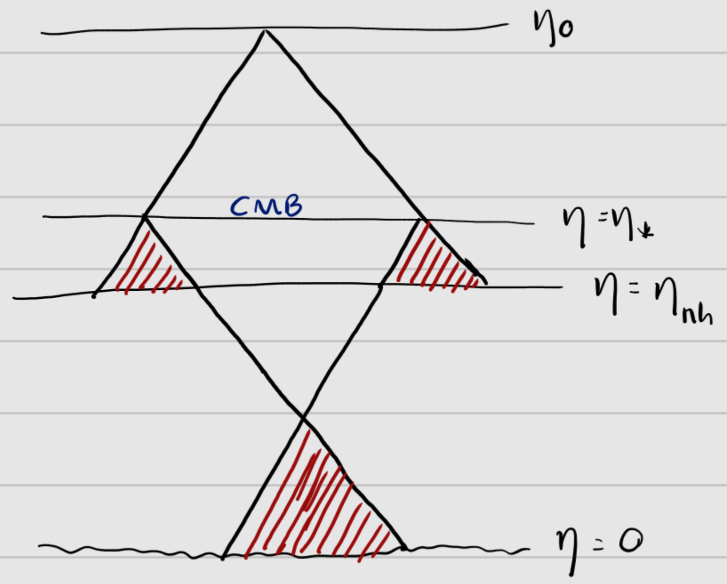
A solução? Redução do raio de Hubble comóvel durante o início do universo (inflação)

Todos os problemas vistos assumem que o horizonte comóvel aumentou desde o Big Bang. Se assumirmos um universo que se expande de forma acelerada por um tempo, teremos a possibilidade de reunir distâncias aparentemente acausais sob o horizonte de partículas.

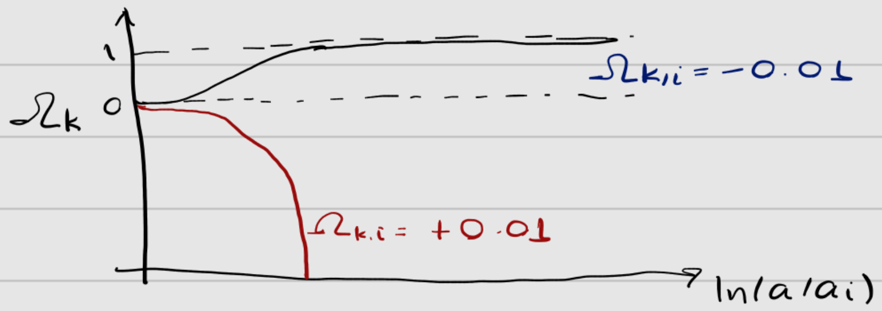
$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{aH}\right) < 0 \Rightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{\dot{a}}\right) = -\frac{\ddot{a}}{\dot{a}^2} < 0 \Rightarrow \boxed{\ddot{a} > 0}$$

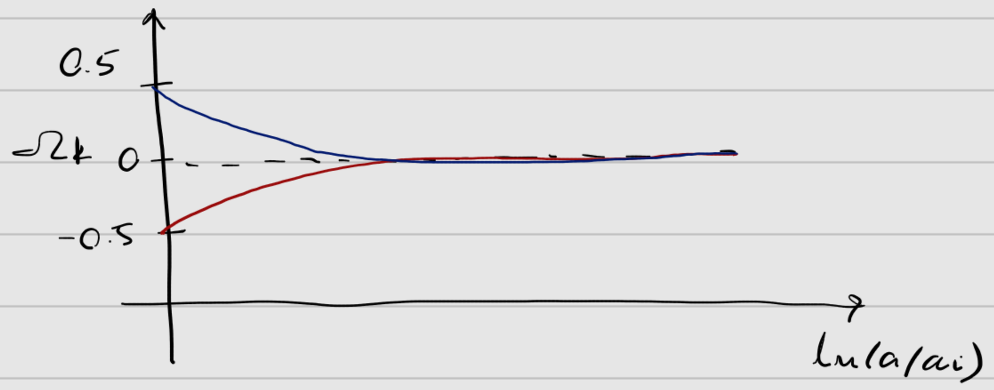
Vejamos o que acontece com os problemas previamente citados:

Problema do Horizonte



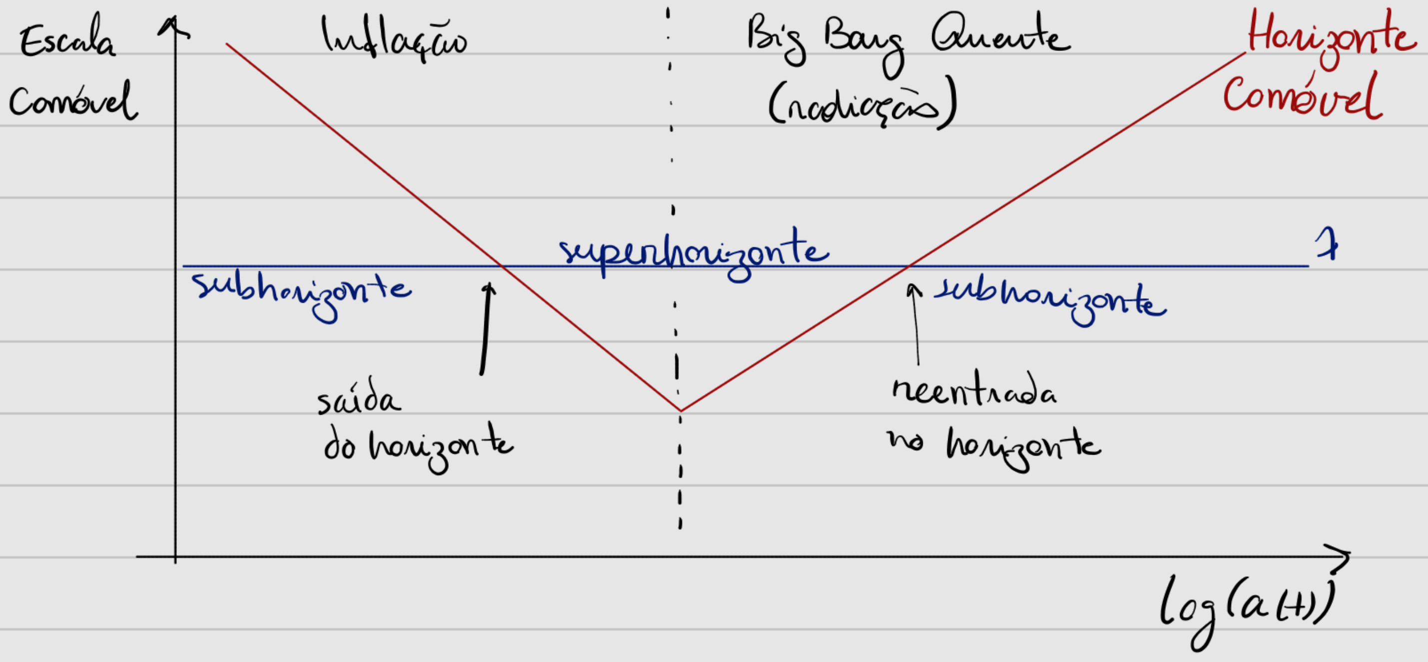
Problema da Planicidade





Menção honrosa: problema dos monopolos magnéticos

Correlações de Super-Horizonte



Escalas que entraram no horizonte hoje, 60 "e-folds" (dobras exponenciais) após o fim da inflação, saíram do horizonte 60 dobras antes do fim da inflação.

Duração da Inflação

Se todo o universo observável era menor que o raio comóvel de Hubble no começo da inflação, nossos problemas são resolvidos

$$(a_0 H_0)^{-1} < (a_i H_i)^{-1}$$

Assumindo que H era constante durante a inflação, calculamos o número de e-folds (dobras)

$$N_{tot} \equiv \ln\left(\frac{a_f}{a_i}\right)$$

A quantidade de dobras dependerá da temperatura do universo no início de sua fase quente, chamada temperatura de reaquecimento (veremos por quê em breve). Assumindo $T_{RH} \sim 10^{15}$ GeV, temos

$$(a_i H_i)^{-1} > (a_0 H_0)^{-1} \sim 10^{28} \left(\frac{T_{RH}}{10^{15}\,\mathrm{GeV}}\right)(a_f H_f)^{-1}$$

logo, $N_{tot} \equiv \ln\left(\frac{a_f}{a_i}\right) > 60 + \ln\left(T_{RH}/10^{15}\,\mathrm{GeV}\right)$

Na prática, cosmólogos adotam $55 < N_{tot} < 65$.

A Física da Inflação

Mas o quê causou a inflação? Para responder a essa pergunta, precisamos de um modelo de fluido cosmológico capaz de gerar a dinâmica do universo inflacionário. Em geral, os físicos se apoiam na teoria quântica de campos para descrever este universo. O tensor de energia-momento que gera um universo inflacionário é obtido a partir de um hipotético campo de ínflatons, cuja densidade de energia é dominante durante todo o processo inflacionário.

Vamos voltar à equação da aceleração:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P)$$

$\ddot{a} > 0 \implies P < \rho/3$. Assumindo $\boxed{P = -\rho}$, temos

$$\boxed{a(t) = a_i \, e^{H(t_f - t_i)}}$$

Para obter um fluido com $P = -\rho$, precisamos de um campo escalar de partículas φ, descrito pela seguinte Lagrangiana:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}\partial^\mu \varphi \, \partial_\mu \varphi - V(\varphi)$$

O segredo da dinâmica do inflaton estará na forma do seu potencial. Veremos isso em breve.

O tensor de energia-momento para este campo é obtido através de:

$$T_{\mu\nu} = -2\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial g^{\mu\nu}} + g_{\mu\nu}\mathcal{L} = \partial_\mu \varphi \, \partial_\nu \varphi + g_{\mu\nu}\left[-\frac{1}{2}g^{\alpha\beta}\partial_\alpha \varphi \, \partial_\beta \varphi - V(\varphi)\right]$$

O que nos permite, por comparação com o tensor de um fluido perfeito, obter a pressão e densidade de energia:

$$\rho_\varphi = \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + V(\varphi) \; ; \qquad P_\varphi = \frac{\dot{\varphi}^2}{2} - V(\varphi)$$

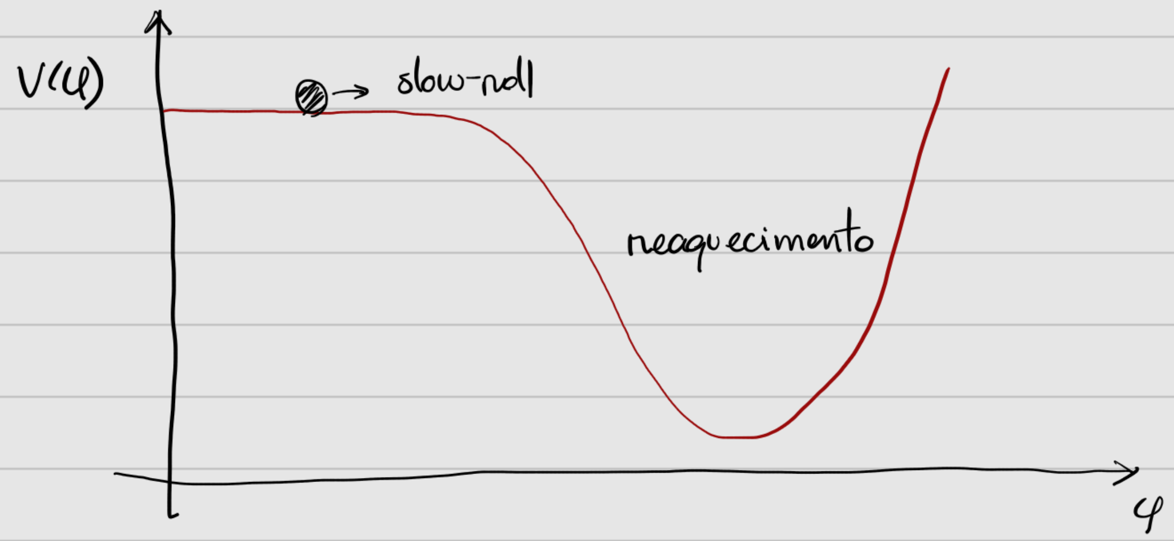
Voltando à equação da aceleração, o sinal de $\ddot{a}$ é dado por

$$\rho_\varphi + 3P_\varphi = 2[\dot{\varphi}^2 - V]$$

$$\ddot{a} > 0 \Rightarrow V > \dot{\varphi}^2$$

Para obtermos expansão exponencial (estágio de Sitter), temos então que obedecer à condição de slow-roll

$$\boxed{\dot{\varphi}^2 \ll V(\varphi)}$$



modelo de potencial inflacionário simples

Fim da Inflação: Reaquecimento

Quando a inflação chega ao fim, todas as possíveis partículas existentes antes desse período estão tão diluídas que suas densidades de energia são quase zero, e a temperatura do universo é praticamente nula. Entretanto, o fim da inflação deve ser conectado ao Big Bang quente de alguma maneira. Esse momento é conhecido como reaquecimento, e durante este período o campo de inflatons despeja sua energia nos campos de matéria do modelo padrão, preenchendo o universo com partículas e aquecendo-o até $T_{RH} \sim 10^{15}$ GeV (estimado, mas ainda incerto).

O reaquecimento (assim como o campo de inflaton) é tema de pesquisa moderna e um dos problemas não resolvidos da cosmologia.

Evidências: Ondas Gravitacionais Primordiais

O campo de inflatons, por sua natureza quântica, produziu flutuações que foram amplificadas pelo processo inflacionário. Essas mesmas flutuações semeiam as perturbações do fluido cosmológico que serão observadas no CMB e, posteriormente, na estrutura de larga escala do universo.

Mas flutuações no tensor de energia-momento também induzem perturbações na métrica, que produzem ondas gravitacionais que preenchem todo o universo. Esse background de ondas gravitacionais, caso detectado, seria uma evidência definitiva da existência do período inflacionário.

Por enquanto, a inflação cósmica permanece como o melhor modelo teórico capaz de resolver tanto os problemas da planicidade e do horizonte enquanto ainda justifica a origem das anisotropias do CMB que semeiam o crescimento das estruturas de larga escala.