

O modelo de Inflação: progressos e desafios.

Leila Lobato Graef

Universidade Federal Fluminense.

Resumo

Após o desenvolvimento do Modelo Padrão da Cosmologia, o Modelo do *Big Bang*, ao que tudo indicava, havia-se construído uma teoria satisfatória capaz de descrever a evolução do Universo a partir de um estado quente e denso inicial. No entanto, algumas questões em aberto levaram à proposta do modelo da Inflação Cosmológica, o qual descreve uma expansão acelerada no Universo antigo que teria durado uma fração de segundo, e após a qual o Universo teria seguido sua expansão conforme previsto pelo Modelo do *Big Bang*. Embora hoje existam alternativas à Inflação que são capazes de resolver as mesmas questões, a Inflação foi a primeira teoria com a qual foi possível se fazer previsões consistentes sobre a estrutura do Universo em larga escala, como a distribuição de galáxias, aglomerados etc., ao fornecer uma descrição para a origem das mesmas. Neste artigo será apresentado o Modelo Inflacionário, desde uma perspectiva histórica e também matemática. Serão abordadas as críticas e desafios que acercam este modelo atualmente e também as perspectivas futuras no que se refere a testes do modelo inflacionário com os novos experimentos.

Abstract

After the development of the Standard Model of Cosmology, the Big Bang Model, it seemed that a satisfactory theory capable of describing the evolution of the universe from an initial hot and dense state had been built. However, some open questions led to the proposal of the Cosmological Inflationary model, which describes an accelerating expansion in the very early universe that would have lasted a fraction of a second, after which the universe has followed its evolution as predicted by the Big Bang model. Although today there are alternatives to Inflation that are capable of resolving the same issues, Inflation was the first theory within which it was possible to make consistent predictions about the structure of the Universe on large scales, like the distribution of galaxies, clusters, etc., as it provided a description for their origin. In this article, the Inflationary Model will be introduced, from a historical and also mathematical perspective. The criticisms and challenges that surround this model nowadays will be addressed and the future perspectives for testing the inflationary model with new experiments will also be discussed.

Palavras-chave: cosmologia, universo primordial, radiação cósmica de fundo, inflação cosmológica.

Keywords: cosmology, primordial universe, cosmic microwave background, cosmological inflation.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v4n2.41170](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v4n2.41170)

1 Introdução

Uma questão que tem se mostrado, em diferentes contextos, fundamental ao longo da história da humanidade refere-se à origem de tudo o que vemos no Universo. Dentro do contexto científico, a resposta para esta questão está intrinsecamente relacionada ao tema da Inflação Cosmológica.

A Inflação é o que chamamos de um modelo cosmológico, uma descrição matemática elaborada com a finalidade de descrever uma possível evolução para o Universo que seja consistente com o que observamos na natureza. As observações cosmológicas nos permitem então testar

continuamente a validade dos modelos cosmológicos, dentro dos limites da capacidade e precisão dos experimentos que desenvolvemos. Antes de descrever a Inflação e como ela está relacionada à esta pergunta fundamental, podemos começar lembrando um pouco da história do surgimento deste modelo.

Em 1915 Einstein postulou suas equações da Relatividade Geral, o que pode ser considerado um dos marcos para o reconhecimento da cosmologia como ciência. Em 1922, Friedmann descobriu a existência de soluções cosmológicas que descreviam um espaço dinâmico, em expansão ou

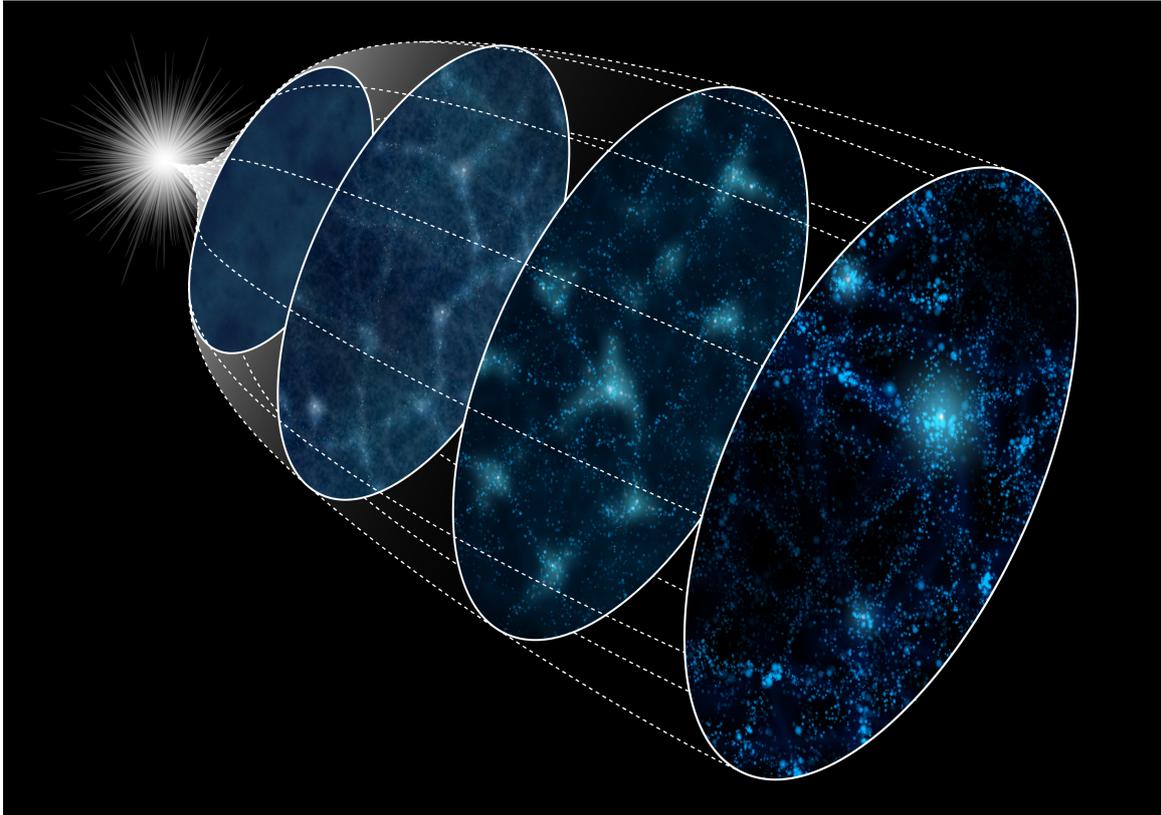


Figura 1: Diagrama esquemático da evolução do Universo desde a Inflação (à esquerda) até o presente (à direita). Estão ilustradas também as flutuações de densidade primordiais (à esquerda) evoluindo para a distribuição atual de galáxias (à direita). Créditos: Institute of Statistical Mathematics (ISN), via [NAOJ](#).

colapso, ao resolver as equações de Einstein. Le-maître, por sua vez, em 1927 derivou o que ficou posteriormente conhecido como a lei de Hubble, a qual descrevia um Universo em expansão, e a propôs como um fenômeno genérico na cosmologia relativística antes mesmo da descoberta da expansão do Universo. Em 1929, Edwin Hubble descobriu que o Universo deveria estar de fato em expansão. Hubble verificou que havia uma velocidade de afastamento das galáxias em relação à Terra que aumentava com a distância da galáxia. Tal comportamento seria explicado considerando um Universo dinâmico e em expansão, o que poderia ser descrito pelas equações de Einstein.

Em 1946, Gamov e seus colaboradores, a partir da chamada teoria da nucleossíntese primordial, previram que o Universo deveria ter começado em um estado muito quente e denso. Eles também previram que, de acordo com esta teoria, o Universo deveria hoje ser permeado por uma radiação na faixa de micro-ondas com espectro de corpo negro, a qual é hoje chamada Radiação Cósmica de Fundo (RCF). Em 1964, Penzias e

Wilson detectaram acidentalmente uma radiação em micro-ondas com características que coincidiavam bem com as previsões teóricas de Gamov e seus colaboradores, ao testarem uma antena. Posteriormente foi confirmado que eles haviam detectado a RCF. Essas observações juntamente com os progressos teóricos acima mencionados, levaram ao desenvolvimento do Modelo do *Big Bang*. Tal modelo descreve um Universo começando a partir de um estado quente e denso e a partir daí se expandindo (e consequentemente se esfriando) desde então [1] (Figura 1).¹ Na cosmologia padrão do *Big Bang*, o estado do Universo é caracterizado inicialmente por uma era cujo conteúdo energético era dominado pela radiação. Essa era teria sido seguida, devido ao resfriamento do Universo, por um estágio dominado pela matéria, ambas as fases associadas à uma expansão desacelerada do Universo. Esta evolução

¹Para uma discussão mais aprofundada sobre o Modelo do *Big Bang* recomendo ao leitor as referências [2-4] que pretendem ser acessíveis ao adotarem uma linguagem menos técnica.

descrita por uma contínua expansão desacelerada partindo de um estado quente e denso dominado pela radiação e depois pela matéria, foi por muito tempo a descrição padrão para o Universo.

Muito tempo depois, já na década de 90, foi descoberto que o Universo estaria atualmente em uma fase de expansão acelerada, o que foi então incorporado pelo Modelo Padrão da Cosmologia. No entanto, o que se sabia até então pelas equações de Einstein, era que enquanto o conteúdo energético do Universo fosse dominado pela matéria que conhecemos, o mesmo deveria expandir desaceleradamente. Para explicar a expansão acelerada foi proposto que deveria ser considerado um termo constante nas equações de Einstein, a chamada constante cosmológica. Este termo estava inicialmente presente nas equações originais de Einstein, tendo sido depois retirado pelo mesmo. Com o termo da constante cosmológica era possível descrever uma expansão acelerada do Universo, e esse termo constante poderia estar associado a um conteúdo desconhecido de energia do Universo.

No entanto, muito antes da descoberta da expansão acelerada atual do Universo, a ideia de que o Universo poderia sofrer expansão acelerada foi levantada pelos proponentes do Modelo Inflacionário. Isso se deu pela necessidade de se explicar certos problemas que apareciam na descrição do Universo pelo então Modelo do *Big Bang*. Após a previsão e a detecção da RCF na década de 60, os cientistas pensaram ter uma história satisfatória para a evolução cósmica, no entanto haviam diversas questões que os intrigavam. A maioria delas de alguma forma se relacionavam à questão do porquê o Universo teria começado com um conjunto bastante específico de propriedades e não com outras. A primeira questão fundamental era: Por que, de acordo com a Radiação Cósmica de Fundo observada, o Universo teria exatamente a mesma temperatura, com 99,997% de precisão, em todas as regiões, mesmo que não houvesse tido tempo suficiente para que todas as diferentes regiões estivessem tido contato e pudessem termalizar atingindo um estado de equilíbrio? Além desta, haviam outras questões que intrigavam. Uma delas é o que chamamos de problema da planicidade. Quantificamos a densidade de matéria/energia do Universo através da grandeza que chamamos parâmetro de densidade

$\Omega(t)$. De acordo com as equações de Einstein, a densidade de matéria e energia está relacionada com a geometria do Universo. Diversas observações, entre elas as da RCF, mostram que o parâmetro de densidade tem um valor tal que implica em um Universo com geometria plana, sendo este valor dado por aproximadamente $\Omega \approx 1$ [5]. A princípio, seriam plausíveis de acordo com o modelo padrão qualquer uma dentre as três possibilidades de curvatura: positiva (Universo fechado); negativa (Universo aberto) e nula (Universo plano). No entanto, este parâmetro $\Omega(t)$ (associado à densidade total de matéria/energia) evolui com a expansão do Universo. Quanto mais extrapolamos ao passado, mais próximo da unidade tem que estar este parâmetro para que ele mantenha o valor próximo de 1 hoje. Estima-se que no início do Universo, quando o mesmo tinha energias da ordem da energia de Planck, o desvio no valor de Ω com relação a 1 precisaria ser da ordem de 10^{-60} para permitir que o Universo atual possua a planicidade que observamos. O fato de o Universo primordial possuir uma geometria plana com tamanha precisão exige um ajuste fino muito grande em um parâmetro que, a princípio poderia ter um valor arbitrário. O modelo padrão sozinho não é capaz de fornecer uma explicação para um ajuste fino tão grande. Além destas questões haviam também questões ainda não compreendidas relacionadas à evolução da entropia no Universo e à ausência de relíquias do regime de alta energia no Universo (como monopolos magnéticos), as quais são previstas por extensões do Modelo Padrão da Física de Partículas no Universo antigo mas que nunca foram observadas.

Diante de tais questões, buscou-se desenvolver um mecanismo teórico que transformasse condições iniciais arbitrárias naquelas esperadas para se levar ao Universo que observamos. Este novo mecanismo, para ser um bom modelo científico, deveria ser capaz de reproduzir todos os sucessos do Modelo do *Big Bang* e gerar novas previsões adicionais que nos permitissem testar o novo mecanismo em comparação com o modelo original do *Big Bang*. Esse mecanismo é o que hoje conhecemos como Inflação Cósmica. Em 1979/80, Guth e Sato [6, 7] propuseram o primeiro modelo inflacionário, de acordo com o qual deveria ter havido uma fase no início do Universo em que o mesmo teria passado por uma expansão acelerada

conhecida como de Sitter. Nessa fase o Universo teria expandido bilhões de vezes o seu tamanho em uma fração de segundos, antes que a energia da componente responsável pela Inflação (o chamado campo ínflaton) se convertesse rapidamente em radiação comum. Este último processo de conversão rápida da energia do ínflaton para radiação é o que chamamos de reaquecimento. É no reaquecimento que o Universo atinge uma temperatura significativamente alta após a Inflação e faz a transição para o estado quente, denso, uniforme e em expansão desacelerada que associamos ao modelo do *Big Bang*.² Com a Inflação o Universo teria passado do seu estado de baixa entropia na Inflação para um estado de entropia muito maior, após o reaquecimento, conforme previsto pelo modelo do *Big Bang*. A Inflação também ajuda a explicar a temperatura uniforme da RCF e a homogeneidade observada em grandes escalas no Universo, já que o Universo, de acordo com este modelo, teria estado causalmente conectado no passado, tendo estado todas as regiões em contato à mesma temperatura. O modelo inflacionário era capaz de explicar também a planitude observada no Universo atual. Ao expandir o espaço em uma escala de tempo incrivelmente curta para um tamanho tão grande, sua geometria se tornaria indistinguível de plana para qualquer observador. Também a ausência de relíquias observadas que viriam do Universo antigo, como monopolos magnéticos, seria facilmente explicada visto que a Inflação as teria diluído à distâncias não observáveis.

A solução Inflacionária forneceria então uma explicação para as questões em aberto do modelo do *Big Bang*. No entanto, de acordo com as equações de Einstein, um Universo dominado por radiação ou matéria sempre estaria expandindo desaceleradamente. Isto implica que uma expansão acelerada deveria estar relacionada a um conteúdo energético não usual no Universo. Já se sabia naquela época que um campo escalar poderia possuir propriedades que levariam à uma expansão acelerada no Universo, no caso deste campo dominar o conteúdo energético do Universo. Embora o único campo escalar experimentalmente

conhecido seja atualmente o Higgs, muitos modelos de Física de Partículas preveem a existência de diversos campos escalares ainda não descobertos experimentalmente. Por esta razão os campos escalares foram usualmente considerados como conteúdo energético do Universo para explicar a expansão acelerada do mesmo. No caso da Inflação, este campo deveria ter dominado o conteúdo energético do Universo apenas durante uma pequena fração de segundo em que durou a Inflação.

A ideia básica de Inflação que foi originalmente proposta por Guth [6] e Sato [7] de forma independente, passou a ser denominada Inflação antiga. Esta correspondia à uma expansão exponencial do Universo antigo que seria causada por uma transição de primeira ordem do falso vácuo do campo ínflaton para o vácuo verdadeiro. No entanto, existem graves problemas com este modelo, relacionados ao fato de que neste cenário o Universo se tornaria não homogêneo após o fim da Inflação [9]. Uma nova versão do cenário inflacionário foi proposta por Linde [10], Albrecht e Steinhardt [11] em 1982, que é a chamada “Nova Inflação”. Neste modelo, o campo ínflaton possui uma energia cinética muito menor que a energia potencial e o campo se aproxima lentamente e suavemente do o vácuo verdadeiro. Apesar do sucesso que este modelo teve por muito tempo, o mesmo sofre de problemas de ajustes finos, como discutiremos posteriormente. Em 1983 Linde [12] considerou uma outra versão da Inflação denominada Inflação Caótica, na qual as condições iniciais dos campos escalares são caóticas. De acordo com este modelo, nosso Universo homogêneo e isotrópico poderia ter se originado nas regiões onde a Inflação teria ocorrido por tempo suficiente. Enquanto a velha e a nova Inflação necessitam da suposição de que o Universo estava em um estado de equilíbrio térmico desde o início, a Inflação Caótica não necessita tal suposição.

Voltamos agora ao nosso ponto de partida. O que a Inflação tem a ver com a pergunta fundamental “De onde veio tudo o que vemos no Universo?”. Explicar a formação das estruturas do Universo, como galáxias, aglomerados, etc., constitui um dos grandes objetivos da cosmologia atualmente. A ideia mais estudada é a de que flutuações quânticas teriam surgido no Universo primordial de altas energias e estas seriam

²É importante ressaltar que existe um modelo chamado de Inflação Morna [8] que propõe uma transição mais suave e lenta entre o domínio energético do ínflaton e o domínio da radiação usual no Universo antigo.

a origem das estruturas do Universo. Estas flutuações quânticas seriam regiões com uma pequena flutuação (variação) na densidade de energia em torno da densidade média do Universo, distribuídas pelo espaço em todas as escalas de tamanho. Sabemos pela RCF que o espaço é bastante homogêneo em largas escalas. No entanto, a mesma RCF nos mostra pequenas flutuações de densidade de energia sobre este *background* homogêneo e isotrópico. Sabemos, de acordo com a gravitação, que é necessário haverem regiões com concentração de matéria/energia para que haja aglomeração gravitacional em torno delas. Estas pequenas flutuações de densidade que vemos na RCF são da ordem de uma parte em 100.000, e teriam sido as responsáveis pela formação de regiões de inhomogeneidade (concentração de densidade de energia) em torno das quais teriam se formado as primeiras estruturas devido à atração gravitacional. No entanto, se estas flutuações tiveram origem quântica, de acordo com o princípio da incerteza da mecânica quântica elas teriam existido por um intervalo de tempo muito curto para que houvesse tempo de gerar aglomeração gravitacional. Portanto, para explicar a formação de estruturas, um modelo de Universo primordial deve ser capaz de transformar as flutuações em escalas quânticas para escalas clássicas. E a expansão acelerada do Universo proposta no modelo inflacionário faria exatamente este papel ao esticar tais regiões para tamanhos clássicos. Em resumo, o cenário da Inflação sugere que inicialmente flutuações de origem quântica teriam surgido nos primórdios do Universo, como esperado a partir do princípio da incerteza. As regiões das flutuações (assim como todo Universo) teriam sido “esticadas” durante a Inflação. Passando a ter então escalas clássicas, elas teriam evoluído gravitacionalmente formando as estruturas presentes no Universo.³

³Uma alternativa para a origem quântica das flutuações, poderia ser uma possível origem térmica, visto que flutuações térmicas randômicas poderiam ter surgido já há nível clássico no Universo antigo de altas energias (e altas temperaturas) devido à natureza estatística da física térmica. Conforme analisado no trabalho das Refs. [13, 14], por exemplo, essa possibilidade implica em diferentes previsões testáveis. Essas pequenas flutuações, em ambos os cenários, podem ser vistas na RCF, no entanto diferentes cenários preveem uma distribuição espacial diferente para estas flutuações, o que nos permite testar tais previsões com os dados observacionais.

Desta forma, o paradigma inflacionário não apenas fornece uma excelente maneira de resolver os problemas mencionados do modelo do *Big Bang*, mas também gera flutuações de densidade que foram o berço das estruturas em larga escala no Universo. Ter sido a primeira teoria capaz de fornecer uma explicação causal pra origem das estruturas do Universo é considerada por muitos como a principal característica da Inflação. Apesar de ter sido a primeira, hoje existem outros modelos capazes de explicar essa formação de estruturas, embora de forma menos intuitiva, como certos modelos de ricochete por exemplo.

A seção seguinte fornecerá uma apresentação da descrição matemática da expansão inflacionária. O leitor que não esteja interessado nesta descrição matemática pode seguir para a Seção 3 sem perda de continuidade no texto.

2 O mecanismo físico da inflação

Conforme discutido acima, a Inflação descreve um estágio da evolução do Universo primordial no qual a sua expansão ocorreu de maneira exponencial durante uma fração de segundo [6]. Para descrever esta expansão é preciso considerar uma forma apropriada para se definir distâncias no espaço-tempo da Relatividade Geral.

No espaço plano usual, onde efeitos da relatividade não precisam ser considerados, as distâncias, em geral, podem ser escritas a partir da expressão,

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2, \quad (1)$$

onde a quantidade ds^2 representa uma distância infinitesimal (distância muito pequena) e as quantidades dx^2 , dy^2 e dz^2 representam distâncias infinitesimais em cada uma das 3 dimensões espaciais. No entanto, a relatividade nos ensina que espaço e tempo juntos compreendem um espaço-tempo quadridimensional. Assim, podemos calcular a distância quadridimensional entre dois eventos no espaço-tempo.

Considere dois eventos, um ocorrendo na localização espaço-temporal (t, x, y, z) , e outro ocorrendo na localização espaço-temporal $(t + dt, x + dx, y + dy, z + dz)$. De acordo com a relatividade especial, a separação espaço-temporal entre esses dois eventos em um espaço-tempo plano é

descrita por [15],

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2, \quad (2)$$

onde c é a velocidade da luz e dt é o intervalo de tempo infinitesimal.

Relações como as apresentadas acima, que nos dão a distância entre dois pontos próximos no espaço-tempo, são funções da grandeza conhecida como métrica. Podemos calcular a distância quadridimensional entre dois eventos no espaço-tempo usando a métrica apropriada. A métrica associada à distância dada na equação acima é a chamada métrica de Minkowski, e a mesma aplica-se dentro do contexto da Relatividade Especial (em que o espaço-tempo não é curvado pela presença de massa e energia). Sem nenhum efeito gravitacional, o espaço-tempo de Minkowski é fixo e estático.

Quando a gravidade é adicionada os espaços permitidos são mais dinâmicos. Na década de 1930, os físicos Howard Robertson e Arthur Walker buscaram encontrar a forma que a métrica do espaço-tempo deveria assumir no caso de um Universo espacialmente homogêneo e isotrópico em que as distâncias pudessem se expandir (ou contrair) em função do tempo de acordo com a teoria da Relatividade Geral. A métrica que eles derivaram é chamada de métrica de Robertson-Walker. As distâncias neste espaço-tempo podem ser escritas na forma,

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)(dx^2 + dy^2 + dz^2). \quad (3)$$

O fator $a(t)$, chamado fator de escala, descreve como as distâncias, em um ambiente homogêneo e isotrópico, expandem ou contraem com o tempo. O mesmo é normalizado de modo que $a(t_0) = 1$ no presente momento. No contexto de homogeneidade e isotropia a taxa de expansão do Universo (ou seja a taxa de variação temporal do fator de escala) só depende do tempo, não dependendo, portanto, da posição no espaço. Neste contexto, tudo o que precisamos saber sobre a geometria do Universo está contido na função $a(t)$. Isto é o que se considera na cosmologia padrão, uma dinâmica de fundo do Universo que apenas depende do tempo à qual sobrepõe-se as flutuações cosmológicas, as pequenas perturbações em torno da densidade média do Universo que são função também da posição, ou seja, das coordenadas espaciais.

Durante a Inflação as distâncias espaciais teriam aumentado exponencialmente com o tempo, e portanto o fator de escala evolui no tempo da seguinte forma:

$$a(t) \propto e^{Ht}. \quad (4)$$

Acima, H é o chamado parâmetro de Hubble. O índice inferior indica que estamos considerando o valor deste parâmetro durante o período da Inflação. O parâmetro de Hubble é definido como a razão entre a taxa de variação temporal do fator de escala e o fator de escala ($H = \dot{a}/a$). Durante a Inflação, o parâmetro de Hubble é aproximadamente constante e a variação do fator de escala em um certo intervalo de tempo, de t_i (um certo instante inicial) a t_f (um certo instante final), pode ser calculada através da razão,

$$\frac{a(t_f)}{a(t_i)} = e^{H_i(t_f - t_i)}. \quad (5)$$

Para se ter uma ideia do efeito que uma expansão inflacionária pode ter sobre o tamanho do Universo, consideremos um modelo onde o expoente na equação acima é dado por $H_i(t_f - t_i) = 60$. Nesse caso, temos

$$\frac{a(t_f)}{a(t_i)} = e^{60} \approx 10^{26}. \quad (6)$$

O produto $H_i(t_f - t_i)$, geralmente representado pela letra N , mede a quantidade de Inflação dentro de um dado intervalo de tempo e é chamado de número de *e-folds*. Vemos pela equação acima que 60 *e-folds* fariam com que o Universo aumentasse em cerca de 10^{26} vezes o seu tamanho inicial. O exemplo com $N = 60$ não foi escolhido por acaso. Para resolver os problemas da planicidade e do horizonte no modelo inflacionário mais simples devemos considerar uma Inflação com $N \gtrsim 60$ [16–19].

Como discutido anteriormente, o problema do horizonte se refere ao fato de que no contexto do Modelo Padrão, retrocedendo no tempo de acordo com a dinâmica prevista pelo modelo, as regiões mais distantes que hoje vemos no mapa da RCF com a mesma temperatura não tinham tido tempo de terem estado em contato causal, dado a idade do Universo. Se agora retrocedemos no tempo novamente levando em conta uma fase de expansão acelerada exponencial no início

do Universo, podemos concluir que, considerando a mesma idade para o Universo, tais regiões poderiam ter estado em uma distância tal que haveria tido contato causal entre elas. Assim a Inflação resolve o problema do horizonte. O problema da ausência de relíquias, como monopolos magnéticos, também pode ser compreendida intuitivamente ao se pensar que no cenário da Inflação tais monopolos poderiam ter sido produzidos e em seguida “diluídos” pela expansão inflacionária, ou seja, eles estariam fora da região observável do Universo. Embora a Inflação forneça uma solução simples e intuitiva para estes problemas, existem cenários alternativos à Inflação, como alguns modelos de ricochete, que são capazes de resolver os mesmos problemas sem levar em conta uma expansão acelerada no Universo [20–24].

3 Desafios do cenário inflacionário

Apesar do enorme sucesso do modelo inflacionário em ter sido o primeiro modelo a dar uma explicação causal pra formação de estruturas do Universo, além de ter previsto inicialmente o espectro da radiação cósmica de fundo em boa concordância com as observações, os modelos inflacionários sofrem de sérios problemas conceituais.

Como discutido anteriormente, a Inflação foi inicialmente proposta como uma forma de fornecer uma explicação mais natural para as grandezas que observamos no Universo, evitando a necessidade de se aceitar valores finamente ajustados sem justificativa a priori para estes. No entanto, para que a Inflação ocorra com sucesso é necessário que diversos parâmetros do modelo sejam finamente ajustados, como os parâmetros do potencial do campo escalar ínflaton, responsável pela Inflação, e suas condições iniciais. Outro ponto importante é que a Inflação não evita o problema da singularidade do *Big Bang*, o qual pode ser evitado em modelos alternativos [25].

Outro sério problema é o chamado problema trans-Planckiano [26, 27]. Em muitos modelos de Inflação, em particular na chamada Inflação caótica, o aumento das distâncias no Universo é grande o suficiente durante a Inflação para que escalas de tamanho que hoje observamos no Universo, tivessem um comprimento menor que o comprimento de Planck no início da Inflação. No

entanto, nestas escalas que estão no chamado regime de Planck (altas energias e pequenos comprimentos) espera-se que a Relatividade Geral não seja mais a teoria adequada para descrever o Universo. Espera-se que uma teoria de gravitação quântica deva ser importante para descrever esse regime, e atualmente ainda não existe um consenso sobre qual seria esta teoria. Qualquer modelo cosmológico, nos instantes iniciais da expansão do Universo, encontra o problema de como descrever esse regime de forma consistente.⁴ A diferença fundamental é que nos cenários de Inflação, devido à rápida expansão do Universo, essas pequenas escalas, inicialmente no regime de Planck, foram “esticadas” ao ponto de hoje terem uma escala de tamanho acessível às observações cosmológicas. Ocorre que o procedimento padrão na Cosmologia usualmente consiste em utilizar os dados da RCF para inferir as condições do Universo antigo, e a partir daí evoluir essas condições no tempo (usando as equações da Cosmologia) para prever o Universo hoje, permitindo assim comparar previsões de modelos cosmológicos com as observações do Universo recente. No entanto, o fato de estarmos usando as teorias clássicas da Cosmologia para evoluir grandezas inicialmente na escala de Planck, torna a consistência do procedimento adotado questionável. Por outro lado, o fato de a Inflação tornar as escalas inicialmente da ordem do comprimento de Planck acessíveis aos experimentos atuais, pode ser visto como uma janela de oportunidade para se estudar a física neste regime de altas energias. A Cosmologia, com a expansão do Universo, nos permite trazer ao regime observável escalas que de outra forma seriam impossíveis de serem acessadas em experimentos terrestres, como aceleradores de partículas.

Outra questão pertinente na discussão que acerca a cosmologia inflacionária está relacionada à chamada “Inflação eterna”. A Inflação prevê que Universo primitivo teria passado por um breve período de expansão acelerada antes que a energia do campo ínflaton se convertesse em radiação comum. Porém, em diversas classes de modelos inflacionários (não necessariamente todos),

⁴É importante, no entanto, mencionar que existem propostas de modelos de gravitação quântica integrados ao cenário da Inflação cósmica, como por exemplo, o modelo chamado *Loop Quantum Cosmology* [28–30]

a energia do inflaton se converteria em radiação em alguns lugares, mas em outros a Inflação continuaria. São as flutuações quânticas do campo que fazem com que esse processo continue acontecendo para sempre em alguns lugares, por isto o nome “Inflação eterna” [31]. Embora de acordo com este modelo o nosso Universo estivesse em uma região onde a Inflação de fato terminou, a grande questão é que este tipo de processo pode levar a um cenário de multiverso. Para algumas pessoas, a previsão da existência de multiversos não é necessariamente um problema e inclusive, pode gerar o contexto necessário pra explicar uma série de questões. A existência de um cenário de multiverso implica que existem condições físicas muito diferentes em diferentes partes do cosmos, o que implica que o princípio antrópico pode entrar em ação. As possíveis observações que poderíamos fazer do Universo são limitadas pelo fato de que as observações só poderiam acontecer em um Universo com condições para desenvolver vida inteligente, em primeiro lugar. Os proponentes do princípio antrópico argumentam que o mesmo explica por que este Universo tem a idade e as constantes físicas fundamentais necessárias para acomodar a vida consciente, pois se qualquer um destes valores fosse diferente, não estaríamos aqui para fazer observações. No cenário de multiverso é possível argumentar que todos os valores possíveis das grandezas físicas existem em diferentes Universos, e observamos um Universo com grandezas físicas finamente ajustadas pois, apenas neste Universo, dentre todos, poderíamos existir para observar. Para outros cientistas este mesmo cenário de multiverso é interpretado como sendo cientificamente um desastre. A existência de infinitas regiões do espaço-tempo, cada uma com condições locais potencialmente diferentes e todas as possibilidades se realizando em algum lugar, sugeriria que a Inflação não é capaz de fazer previsões e, portanto, teria seu status de teoria científica questionável. Além disto, é bastante controversa a questão de como se calcular probabilidades em um espaço onde tudo o que é possível acontece infinitas vezes, o que indica que nossa matemática pode ainda não ser muito adequada para lidar com esse tipo de cenário. Esta última perspectiva foi defendida, após o lançamento dos resultados do satélite Planck em 2013, pelos cientistas Anna Ijjas, Paul Steinhardt e Avi Loeb no

artigo da Ref. [32]. Eles argumentam que a existência de uma ampla variedade de modelos inflacionários e a previsão de multiversos em muitos deles implicam juntos que a Inflação “não pode ser avaliada usando o método científico”. Dentre as críticas à Inflação mencionadas por este grupo, também possui destaque as dificuldades de ajuste fino que tornam a Inflação difícil de se iniciar, em particular, a entropia extremamente baixa que é necessária.

Em resposta a este artigo, os cosmólogos Guth, Kaiser e Nomura escreveram outro artigo científico (Ref. [33]). Neste artigo eles afirmam que concordam com Ijjas, Steinhardt e Loeb que questões importantes permanecem em aberto. Uma teoria bem justificada acima da escala de Planck permanece indefinida, assim como uma compreensão completa do problema da singularidade do *Big Bang* e das condições que antecederam a fase final da Inflação. Da mesma forma, embora significativa progressos foram feitos nos últimos anos, uma teoria matemática adequada para lidar com probabilidades em um cenário de multiverso ainda não foi encontrada. Os autores afirmam, no entanto, que discordam de Ijjas, Steinhardt e Loeb que esses desafios representam qualquer tipo de deficiência da cosmologia inflacionária. De acordo com eles, o paradigma inflacionário, com seus muitos sucessos, fornece uma estrutura dentro da qual tais questões pode ser investigadas. Esta linha de pensamento também foi defendida por Andrei Linde no artigo da Ref. [34].

Ijjas, Steinhardt e Loeb também responderam à carta no artigo científico da Ref. [35]. Em sua resposta, entre outros argumentos, o grupo menciona que os modelos de Inflação capazes de resolver os problemas do Modelo Padrão e que ao mesmo tempo são favorecidos pelos últimos dados do Planck não correspondem aos modelos mais simples de Inflação, os quais eles chamam de Inflação clássica. E esse é um ponto relevante, de acordo com eles, tendo em vista que uma das vantagens reivindicada por muitos defensores da Inflação é a simplicidade do modelo.

A possibilidade de modelos alternativos à Inflação que resolvem os mesmos problemas e que também estão atualmente em acordo com as observações mantém vivo o debate. Nos próximos anos, com os próximos experimentos que estão previstos para serem lançados, uma quantidade

enorme de dados cosmológicos nos estarão acessíveis, trazendo informações sobre o Universo primitivo e sua evolução. Estes dados deverão reaquecer a discussão acerca da Inflação e modelos alternativos, trazendo novos capítulos para este interessante debate.

4 Discussão e perspectivas

Além de tudo o que já aprendemos com os dados da RCF até agora, ainda há muita informação para ser obtida com os próximos dados. Experimentos da próxima geração irão sondar este sinal com uma sensibilidade muito maior, nos permitindo aprender mais sobre os primórdios do Universo e sua evolução posterior. Para este próximo estágio, será necessário garantir uma infraestrutura de análise de dados que seja capaz de lidar com o dilúvio de dados aos quais teremos acesso. Certamente a inteligência artificial terá um papel importante no processamento de tamanha quantidade de dados.

Os recentes avanços observacionais permitiram que modelos do Universo primordial fossem testados com crescente precisão. Para irmos mais a fundo com o desenvolvimento e testes de modelos, seja de Inflação ou alternativas, será necessário que os novos experimentos explorem dados além da temperatura da RCF. Até agora, os mapas da RCF têm mostrado as flutuações mínimas de temperatura dos fótons da RCF, as quais estão associadas às flutuações de densidade de energia no Universo antigo, que foram as sementes das estruturas que hoje vemos no Universo. Para seguirmos avançando no entendimento do Universo primordial através dos dados da RCF, a partir de agora será necessário o uso de novas tecnologias para investigar também a polarização dos fótons da RCF. Ondas gravitacionais primordiais advindas dos primeiros instantes do Universo, as quais são previstas com diferentes características por modelos de Inflação e alternativas, polarizariam os fótons da RCF. Assim, a obtenção de sinais de polarização intrínsecos na RCF, os chamados modos B, confirmariam a previsão de ondas gravitacionais primordiais, as quais são o sinal mais antigo que podemos obter do Universo. O padrão previsto para a polarização destes fótons possui características bastante específicas de cada mo-

delo cosmológico. Detectar o padrão de polarização dos fótons da RCF nos forneceria uma nova forma de se testar modelos do Universo antigo. A não detecção desta polarização também seria uma informação importante, já que isto selecionaria aqueles modelos do Universo antigo que preveem uma amplitude indetectável de polarização nos fótons da RCF.

Novos experimentos de detecção da RCF que estão iniciando, ou perto de serem lançados, irão buscar estes sinais de polarização. Entre eles podemos mencionar experimentos terrestres como o *Simons Observatory* [36], construído no deserto do Atacama para medir temperatura e polarização da RCF e o CMB-S4 [37], conjunto de telescópios localizados no polo sul e no deserto do Atacama, previsto para iniciar em torno de 2030 com uma sensibilidade bem maior que o *Simons Observatory*. Entre as missões espaciais podemos mencionar o PICO (*The Probe of Inflation and Cosmic Origins*) [38], proposta de missão espacial que deverá varrer o céu por 5 anos, fornecendo mapas de temperatura e polarização com sensibilidade e performance extremamente superior ao Planck. Além destes, um outro experimento importante nesta área será o satélite LiteBIRD da Agência Espacial Japonesa (JAXA) [39]. Com seu lançamento previsto já para 2027, deverá observar todo o céu por três anos desde o espaço, com um nível de sensibilidade 30 vezes melhor do que os experimentos similares anteriores. Um objetivo comum destes experimentos será buscar na RCF sinais de ondas gravitacionais primordiais. Obviamente, detectar os modos B da RCF não será uma tarefa fácil. O principal problema será a identificação do sinal, o qual é facilmente confundido com sinais de “ruído” pelo experimento. Se o LiteBIRD ou futuros observatórios terrestres detectarem essa polarização, abriremos uma nova janela para o Universo, visto que as ondas gravitacionais primordiais, além de serem um sinal de natureza totalmente independente do eletromagnético, nos trariam as informações mais antigas que podemos ter do Universo.

A cosmologia possui a grande vantagem de, com a expansão do Universo, trazer ao regime observável fenômenos que seriam impensáveis de serem testados experimentalmente em outros contextos. É importante pensar nesta oportunidade como uma busca por uma compreensão mais

abrangente da natureza, que deverá trazer impacto nas mais diversas áreas da física. Será com certeza muito interessante acompanhar a continuidade das discussões aqui apresentadas à luz dos novos dados que estão por vir. Além de abrir novos caminhos para abordar as ideias aqui apresentadas, é interessante pensar quais as novas questões que estes dados poderão nos trazer nos próximos anos. Ter acesso aos sinais mais antigos do cosmos é algo que poderá abrir uma série de novas perguntas que estão hoje além do alcance da nossa imaginação. Ficaremos aguardando curiosamente pelos próximos capítulos da história da cosmologia, e pelo que ela nos dirá sobre a história do Universo.

Agradecimentos

Agradeço ao suporte do CNPq, processo No. 307052/2019-2, e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), processo No. E-26/201.297/2021. Agradeço também ao IPMU - *Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (University of Tokyo)* - pela hospitalidade.

Sobre a autora

A autora Leila L. Graef (leilagraef@id.uff.br) é atualmente Professora Adjunta do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense (UFF), onde leciona, orienta estudantes de pós-graduação e desenvolve pesquisas científicas. Essas atividades se concentram na área de Cosmologia, especialmente nos temas: Universo primordial, ondas gravitacionais primordiais, radiação cósmica de fundo e energia escura.

Referências

- [1] S. Tsujikawa, *Introductory review of cosmic inflation*, in *2nd Tah Poe School on Cosmology: Modern Cosmology* (2003). [ArXiv: hep-ph/0304257](#).
- [2] H. Kragh, *Cosmology and Controversy* (Princeton University Press, Princeton, 1999).
- [3] H. Kragh, *The Big Bang* (W. H. Freeman & Co., New York, 2001).
- [4] S. Weinberg, *The First Three Minutes (revised edition)* (Perseus Books, New York, 1993).
- [5] N. Aghanim et al., *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, *Astron. Astrophys.* **641**, A6 (2020), [Erratum: *Astron. Astrophys.* 652, C4 (2021)]. [ArXiv: 1807.06209](#).
- [6] A. H. Guth, *The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems*, *Phys. Rev. D* **23**, 347 (1981).
- [7] K. Sato, *First Order Phase Transition of a Vacuum and Expansion of the Universe*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **195**, 467 (1981).
- [8] A. Berera, I. G. Moss e R. O. Ramos, *Warm Inflation and its Microphysical Basis*, *Rept. Prog. Phys.* **72**, 026901 (2009). [ArXiv:0808.1855](#).
- [9] A. H. Guth e E. J. Weinberg, *Could the Universe Have Recovered from a Slow First Order Phase Transition?*, *Nucl. Phys. B* **212**, 321 (1983).
- [10] A. D. Linde, *A New Inflationary Universe Scenario: A Possible Solution of the Horizon, Flatness, Homogeneity, Isotropy and Primordial Monopole Problems*, *Phys. Lett. B* **108**, 389 (1982).
- [11] A. Albrecht e P. J. Steinhardt, *Cosmology for Grand Unified Theories with Radiatively Induced Symmetry Breaking*, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 1220 (1982).
- [12] A. D. Linde, *Chaotic Inflation*, *Phys. Lett. B* **129**, 177 (1983).
- [13] T. Biswas et al., *Cosmological perturbations from statistical thermal fluctuations*, *Phys. Rev. D* **88**(2), 023517 (2013). [ArXiv:1302.6463](#).
- [14] L. L. Graef, *Constraining the spectrum of cosmological perturbations from statistical thermal fluctuations*, *Phys. Lett. B* **819**, 136418 (2021).

- [15] B. Ryden, *Introduction to Cosmology (second edition)* (Ohio State University, Ohio, 2016).
- [16] D. Baumann, *Cosmology* (Cambridge University Press, 2022).
- [17] V. Mukhanov, *Physical Foundations of Cosmology* (Cambridge University Press, Oxford, 2005).
- [18] S. Dodelson, *Modern Cosmology* (Academic Press, Amsterdam, 2003).
- [19] S. Weinberg, *Cosmology* (Oxford University Press, Oxford, 2008).
- [20] R. Brandenberger e P. Peter, *Bouncing Cosmologies: Progress and Problems*, *Found. Phys.* **47**(6), 797 (2017). [ArXiv:1603.05834](#).
- [21] N. Pinto Neto, *Perturbations in bouncing cosmological models*, *Int. J. Mod. Phys. D* **13**, 1419 (2004). [ArXiv:hep-th/0410225](#).
- [22] M. Novello e S. E. P. Bergliaffa, *Bouncing Cosmologies*, *Phys. Rept.* **463**, 127 (2008). [ArXiv:0802.1634](#).
- [23] L. L. Graef et al., *Dynamics of Cosmological Perturbations and Reheating in the Anamorphic Universe*, *JCAP* **04**, 004 (2017). [ArXiv:1701.02654](#).
- [24] J. Khoury et al., *The Ekpyrotic universe: Colliding branes and the origin of the hot big bang*, *Phys. Rev. D* **64**, 123522 (2001). [ArXiv:hep-th/0103239](#).
- [25] R. H. Brandenberger, *Principles, progress and problems in inflationary cosmology*, *AAPPS Bull.* **11**, 20 (2001). [ArXiv:astro-ph/0208103](#).
- [26] J. Martin e R. H. Brandenberger, *The Trans-Planckian problem of inflationary cosmology*, *Phys. Rev. D* **63**, 123501 (2001). [ArXiv:hep-th/0005209](#).
- [27] E. G. M. Ferreira e R. Brandenberger, *The Trans-Planckian Problem in the Healthy Extension of Horava-Lifshitz Gravity*, *Phys. Rev. D* **86**, 043514 (2012). [ArXiv:1204.5239](#).
- [28] A. Ashtekar e E. Bianchi, *A short review of loop quantum gravity*, *Rept. Prog. Phys.* **84**(4), 042001 (2021). [ArXiv:2104.04394](#).
- [29] I. Agullo e P. Singh, *Loop Quantum Cosmology* (WSP, 2017), 183–240. [ArXiv:1612.01236](#).
- [30] G. S. Vicente, R. O. Ramos e L. L. Graef, *Gravitational particle production and the validity of effective descriptions in loop quantum cosmology*, *Phys. Rev. D* **106**(4), 043518 (2022). [ArXiv:2207.00435](#).
- [31] A. H. Guth, *Eternal inflation and its implications*, *J. Phys. A* **40**, 6811 (2007). [ArXiv:hep-th/0702178](#).
- [32] A. Ijjas, P. J. Steinhardt e A. Loeb, *Inflationary paradigm in trouble after Planck2013*, *Phys. Lett. B* **723**, 261 (2013). [ArXiv:1304.2785](#).
- [33] A. H. Guth, D. I. Kaiser e Y. Nomura, *Inflationary paradigm after Planck 2013*, *Phys. Lett. B* **733**, 112 (2014). [ArXiv:1312.7619](#).
- [34] A. Linde, *Inflationary Cosmology after Planck*, in *Post-Planck Cosmology: Lecture Notes of the Les Houches Summer School: Volume 100, July 2013*, editado por C. D'Elia et al. (2015), 230–316. [ArXiv:1402.0526](#).
- [35] A. Ijjas, P. J. Steinhardt e A. Loeb, *Inflationary schism*, *Phys. Lett. B* **736**, 142 (2014). [ArXiv:1402.6980](#).
- [36] P. Ade et al., *The Simons Observatory: Science goals and forecasts*, *JCAP* **02**, 056 (2019). [ArXiv:1808.07445](#).
- [37] K. N. Abazajian et al., *CMB-S4 Science Book, First Edition* (2016). [ArXiv:1610.02743](#).
- [38] S. Hanany et al., *PICO: Probe of Inflation and Cosmic Origins* (2019). [ArXiv:1902.10541](#).
- [39] D. Paoletti, *The LiteBIRD mission*, *PoS ICHEP2022*, 085 (2022).