

Inflação quente

Rudnei O. Ramos

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Resumo

A ideia original de inflação, também conhecida como inflação fria, surgiu para resolver uma série de problemas associados ao modelo do Big Bang. A inflação quente é uma reformulação da dinâmica inflacionária que faz uma ponte mais precisa com possíveis modelos microscópicos que podem levar a tal dinâmica e que possam ter ocorrido no Universo primordial. As conexões com a física da teoria quântica de campos, física estatística e termodinâmica se tornam mais transparentes na inflação quente, o que a torna uma formulação mais apropriada quando queremos comparar seus resultados e previsões com os dados observacionais. Neste artigo, eu revejo as motivações por trás da ideia da inflação quente, sua origem por meio de primeiros princípios e como ela fornece uma descrição que é mais consistente, tanto teórica como observacional, do que a inflação fria.

Abstract

The original idea of inflation, also known as cold inflation, arised to solve a number of problems associated with the Big Bang model. Warm inflation is a reformulation of the inflationary dynamics such as to make a more precise bridge with possible microscopic models that can be able to lead to such dynamics and which is believed to have happened in the primordial Universe. The connections with the physics of quantum field theory, statistical mechanics and thermodynamics become more transparent in warm inflation, which makes it a more appropriate formulation when we want to compare its results and predictions with the observational data. In this article, I review the motivations behind the idea of warm inflation, its origin from first principles and how it can provide a description which is more consistent, both from a theoretical and observational point of views, than cold inflation can give.

Palavras-chave: cosmologia, universo primordial, inflação quente.

Keywords: cosmology, primordial universe, warm inflation.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v4n2.41538](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v4n2.41538)

1 Introdução

A formulação da teoria da inflação cosmológica se deu no começo da década de 1980 [1–3] como uma forma de explicar dois grandes problemas associados ao modelo do Big Bang quente. Um desses problemas é do Universo aparentar ser plano, com espaço tendo curvatura nula ou desprezível nas distâncias cosmológicas muito grandes. O segundo problema é do Universo ser tão homogêneo, muito embora a expansão do Universo impossibilitar que regiões distantes que hoje vemos muito semelhantes em temperatura e densidades, mas que no passado não poderiam estar em contato por tempo o suficiente para alcançar tais propriedades. Inflação, ou mais apropriadamente, uma fase de expansão acelerada que ocorreu por um período de tempo muito curto e quando o

Universo tinha apenas cerca de 10^{-35} segundos de idade e em que o volume do Universo cresce repentinamente por um fator de cerca de 10^{78} , fornece uma solução natural para tais problemas originais do Big Bang (para uma descrição detalhada da ideia de inflação fria, ver o artigo anterior a este neste volume da revista). Logo após também se mostrou que inflação provia mais uma previsão importante, que possibilitava explicar a origem das grandes estruturas em larga escala observadas no Universo atualmente. Flutuações quânticas do vácuo originadas durante a fase da inflação cosmológica seriam capazes de dar origem a pequenas flutuações de densidade e que funcionariam como as sementes para a formação das estruturas em largas escalas vistas no Universo atual. Adicionalmente, como tais variações de densidades formadas no Universo primordial

são acompanhadas também de variações de temperatura, elas são capazes de deixar uma assinatura de pequenas variações na radiação de fundo de micro-ondas cósmica (RFMC) cujas propriedades e características são largamente estudadas atualmente por meio de telescópios e satélites observacionais. As medições dessas pequenas variações na radiação de fundo de micro-ondas cósmica fornece uma das mais atraentes evidências em favor da teoria da inflação cósmica [4, 5].

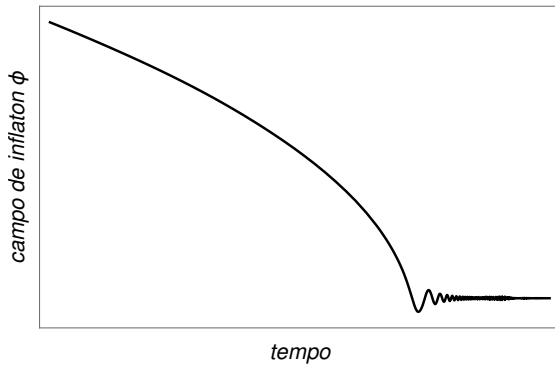
Todo esse sucesso com a teoria do Universo inflacionário levou a muitas construções de diferentes modelos teóricos capazes de realizar tal dinâmica, principalmente no contexto de modelos motivados por física de partículas [6]. Contrastar as previsões desses diferentes modelos com os dados observacionais extraídos com extrema precisão das medições da RFMC se tornou uma área de pesquisa altamente ativa na cosmologia atualmente. Todos os modelos inflacionários são caracterizados por uma fase inicial onde a energia potencial associada a um campo denominado de inflaton domina sobre todas as demais formas de energia (por exemplo, energias cinética e de radiação). Sendo essa condição satisfeita, como resultado das equações de Einstein da relatividade geral, o volume do espaço pode sofrer uma expansão acelerada quase exponencial, que é o que denominamos de inflação cosmológica.

É a partir da descrição da dinâmica inflacionária resultante da dominância da energia potencial do campo de inflaton que a inflação fria acaba se diferenciando da inflação quente. Como durante inflação o volume do espaço rapidamente aumenta, qualquer forma de radiação que por ventura poderia estar presente inicialmente, é rapidamente diluída, levando, na ausência de qualquer forma de produção de radiação durante inflação, a um Universo frio ao final da fase inflacionária (onde a energia potencial do inflaton deixa de ser a forma dominante de energia no Universo). Nessa situação, ao final da inflação a energia armazenada no campo de inflaton deve ser dissipada na forma de radiação de tal forma a reaquecer o Universo e assim produzir o Big Bang quente e suas previsões de sucesso. Essa fase de decaimento da energia do inflaton em radiação é o que denominamos de fase de reaquecimento. A forma que essa fase é formulada teoricamente é tal que o campo de inflaton possui interações com outros

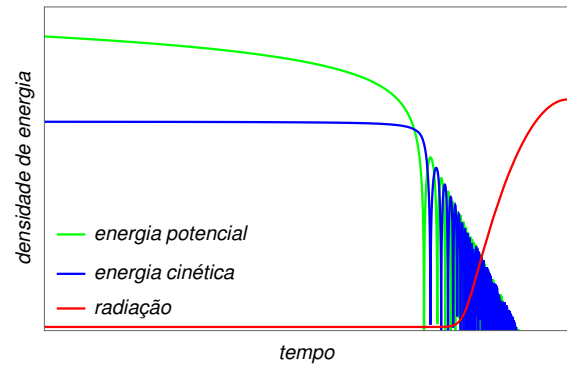
graus de liberdade, por exemplo, interações com outros campos previstos em física de partículas. Na inflação fria, é assumido que tais interações são somente importantes ao final da inflação e responsáveis por levar à fase de reaquecimento. Já na inflação quente, mostra-se que tais interações podem ser importantes mesmo na fase inflacionária, levando a uma produção constante de radiação durante toda a inflação que pode contrabalançar a diluição da mesma pela expansão acelerada do volume do Universo. Como consequência, na inflação quente não há necessidade de uma fase posterior de reaquecimento. Ao final da inflação quente, a dinâmica do Universo é suavemente conectada com aquela do Big Bang quente (ver a Figura 1 para a diferenciação entre as dinâmicas que ocorrem na inflação fria e na quente).

2 A ideia básica da inflação quente

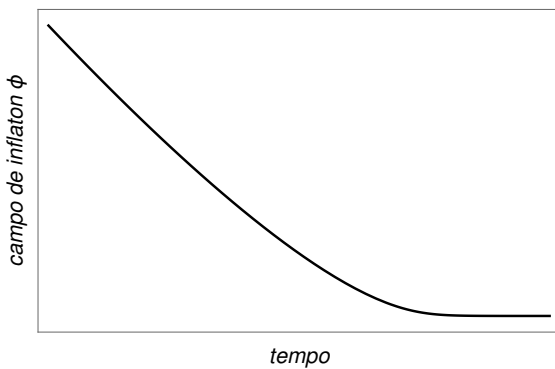
A ideia original da inflação quente [7] advém da observação básica que todo sistema na natureza necessariamente encontra-se em interação com algum meio. Tal interação naturalmente leva a efeitos de dissipação e flutuação sobre o sistema, muito similar como observado no Movimento Browniano em física estatística [8]. No Movimento Browniano, uma partícula imersa num meio (por exemplo um fluido) sofre constantemente interações com as moléculas do meio. Tais interações produzem flutuações aleatórias sobre a partícula e também efeitos dissipativos (por exemplo, devido a viscosidade do meio). Um exemplo em física clássica que modela tais efeitos é o de um oscilador harmônico sujeito a um termo de fricção e outro de flutuação aleatória. Na situação semelhante que acontece na inflação quente, o campo de inflaton faz o papel do sistema, enquanto suas interações com outros possíveis campos geram efeitos de dissipação e também flutuação. Tal descrição pode ser formulada dentro do contexto da teoria quântica de campos fora do equilíbrio (ver por exemplo [9]), o que motivou a extensão de tal formulação na descrição da dinâmica inflacionária em inflação quente por meio de primeiros princípios [10, 11]. Em particular, na inflação quente, o termo de fricção produzido como consequência das interações do campo de inflaton com outros campos leva a dissipação da



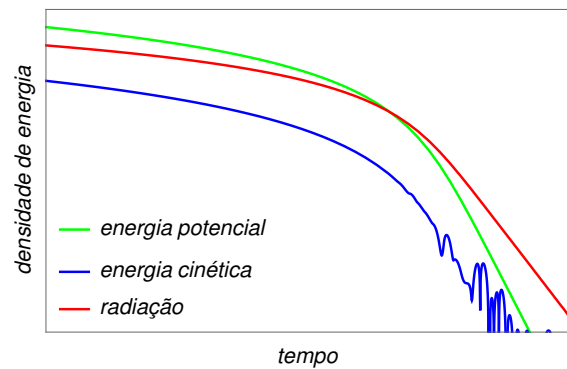
(a) Evolução do campo de inflaton na inflação fria.



(b) Evolução das densidades de energia na inflação fria.



(c) Evolução do campo de inflaton na inflação quente.



(d) Evolução das densidades de energia na inflação quente.

Figura 1: Na inflação fria, ao final da inflação o campo de inflaton ϕ realiza oscilações (painel a) em torno de um mínimo da energia potencial. Nesse momento é que radiação é produzida na inflação fria (curva vermelha no painel b). Na inflação quente, o campo de inflaton tem uma dinâmica amortecida, sem oscilações, durante e ao final da inflação (painel c). Radiação é continuamente produzida, até o momento onde a densidade de radiação se iguala a da energia potencial do inflaton e inflação termina, com a radiação passando a ser a forma de energia dominante (painel d).

energia do inflaton na forma de radiação. Tal produção de radiação ocorre concomitantemente com a fase de inflação do Universo de tal forma a compensar a diluição devido à taxa de aumento acelerado do volume do Universo. Com isso radiação não é diluída como ocorre na inflação fria e o Universo pode suavemente se conectar com a fase do Big Bang quente dominada por radiação.

3 Desenvolvendo modelos de inflação quente por meio de primeiros princípios

Como explicado na seção anterior, na inflação quente a descrição detalhada de como o campo de inflaton interage com outros campos passa ser extremamente relevante. A formulação original da inflação quente segue técnicas originalmente desenvolvidas para se estudar teoria quântica de

campos sob condições de não equilíbrio [9]. Nessa formulação, mostra-se que a dinâmica resultante é análoga àquela vista no Movimento Browniano, resultando numa equação do tipo Langevin da física estatística. Atualmente sabemos diferentes modelos bastante motivados do ponto de vista da física de partículas e que são capazes de levar a uma dinâmica de inflação quente para o Universo primordial [12]. Uma grande vantagem nesses modelos de inflação quente quando comparados com aqueles considerados na inflação fria é na forma do potencial requerido pelo campo de inflaton. Para inflação de fato ocorrer no Universo primordial e ser capaz de resolver os problemas originais do modelo do Big Bang quente, condições bem específicas têm que ser satisfeitas para a forma da energia potencial do campo de inflaton. Em especial, o potencial não pode ter

uma curvatura e inclinação muito grandes, caso contrário a fase inflacionária não seria capaz de iniciar e durar por tempo suficiente para solucionar os problemas já mencionados do modelo do Big Bang.

Muitos potenciais para o campo de inflaton, com as mais diversas formas, já foram considerados para inflação [6] e que são capazes de solucionar tais problemas. Entretanto, quando as previsões teóricas produzidas por esses potenciais são comparadas com os dados observacionais, observa-se que muitos desses potenciais não são consistentes com os dados obtidos através das medições da radiação de fundo de micro-ondas cósmica. No contexto da inflação fria, isso elimina os potenciais mais simples, exatamente aqueles motivados pela física de partículas e teoria quântica de campos (como por exemplo o potencial do campo de Higgs do modelo padrão da física de partículas). Nesse caso, é requerido na inflação fria potenciais mais complicados, em muitas vezes pouco motivados por uma física que temos bastante conhecimento, ou exige-se construções mais elaboradas da dinâmica inflacionária. Embora possível, tais descrições perdem muito o apelo se nos basearmos que a física por trás da ideia da inflação deveria ser bem explicada por uma física de partículas que temos confiança do ponto de vista do nosso conhecimento atual sobre teorias quânticas de campos.

No contexto da inflação quente, como resultado do termo de fricção que leva ao decaimento do campo de inflaton já durante a fase inflacionária e produção de radiação, a dinâmica inflacionária resultante acaba sendo bastante diferente daquela da inflação fria. Em particular, a radiação produzida na inflação quente produz flutuações térmicas, que diferentemente das flutuações de origem quântica da inflação fria, leva a previsões observacionais distintas. Em primeiro lugar, o termo de fricção devido às interações do campo de inflaton com outros campos durante a fase inflacionária afeta as condições de curvatura e inclinação requeridas pela energia potencial do inflaton. Em segundo lugar, tanto a dissipação como a presença de um banho de radiação a uma dada temperatura durante a inflação quente afetam as previsões observacionais que resultam da mesma. Isso alivia sensivelmente as restrições sobre esses potenciais, em particular permitindo que potenci-

ais mais simples e bastante motivados pela física de partículas que conhecemos bem possam agora ser compatíveis com os dados observacionais extraídos da radiação de fundo de micro-ondas cósmica [13–16].

4 Comparação das previsões da inflação quente com os dados observacionais

Como já mencionado na seção anterior, as flutuações originadas durante a inflação quente, as quais dão origem as sementes que vão resultar nas estruturas em larga escala observadas no Universo atualmente, são de origem térmica. Assim como no caso da inflação fria, onde as flutuações importantes são de origem quântica, essas flutuações térmicas também deixam marcas no espectro medido atualmente da RFMC. Em particular, o espectro da densidade de perturbações primordiais passa a depender tanto da magnitude da dissipação durante a inflação quente como também da temperatura do banho de radiação gerado. Com isso, uma quantidade fundamental associada à razão das perturbações de origem gravitacional pelas perturbações de densidade associadas ao campo do inflaton passa a ser menor do que aquela predita pela inflação fria. Essa é uma das razões pelas quais formas de potenciais do inflaton excluídas pelos dados observacionais na inflação fria, por predizerem uma razão de perturbações gravitacionais pela de perturbações de densidade originadas do inflaton maior que o limite observacional, tornam-se agora compatíveis com os resultados observacionais na inflação quente.

Quando olhamos por exemplo para o espectro da RFMC, fica evidente os efeitos dissipativos advindos da inflação quente nos dados observacionais, quando comparados com os resultados da inflação fria. O espectro da RFMC tem duas componentes principais: a componente escalar $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}$ e a componente tensorial (associada às ondas gravitacionais de origem primordial) \mathcal{P}_t . Os dados observacionais da RFMC (como por exemplo os dados obtidos pelo satélite Planck [17]) expressam esses dois tipos de espectro na forma de uma lei de potência, tal que, por exemplo:

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) = A_s \left(\frac{k}{k_*} \right)^{n_s - 1},$$

$$\mathcal{P}_t(k) = A_t \left(\frac{k}{k_*} \right)^{n_t},$$

onde nas expressões acima k denota a escala (número de onda), com k_* sendo uma escala de base, onde as amplitudes A_s e A_t das partes escalares e tensoriais, respectivamente, são medidas. Por exemplo, nos dados do Planck, essa escala (número de onda) é tipicamente escolhida como sendo $k_* = 0.05/\text{Mpc}$, ou seja, correspondendo a um comprimento de onda de aproximadamente 125 megaparsecs (Mpc). Também temos nas duas expressões acima os chamados índices espectrais, n_s para a parte escalar e n_t para a parte tensorial. Duas quantidades que são obtidas dos dados da RFMC são a razão entre as duas amplitudes, $r = A_t/A_s$, e o índice espectral da parte escalar, n_s . Enquanto na inflação fria tanto r quanto n_s são fixos e n_t se relaciona com r pela chamada relação de consistência, $n_t = -r/8$, na inflação quente a presença de dissipação afetam tanto r como n_s , além também de violar a relação entre n_t e r predita na inflação fria. O fato de ter presente na inflação quente um banho de radiação termalizado a uma dada temperatura e uma dissipação do inflaton, tanto r como n_s passam a depender dessas quantidades. Como r e n_s variam com a dissipação e a temperatura depende do modelo de inflação quente construída (ver por exemplo [12]).

Na Figura 2 exemplificamos esse efeito no caso de dois modelos de inflação quente quando aplicados a um potencial do inflaton da forma $V \propto \phi^4$. Potenciais desse tipo, em particular o potencial quártico para o inflaton, são excluídos pelos dados observacionais recentes no contexto da inflação fria, mas vê-se aqui que tal potencial pode ser perfeitamente de acordo com os dados observacionais (mostrados na figura para os dados mais recente do Planck [17]) no caso da inflação quente.

Deve-se notar que as perturbações do inflaton são tanto na inflação fria como na quente da forma Gaussiana. No entanto, é possível pequenos desvios da forma Gaussiana. Os dados obtidos por meio da RFMC provê, no entanto, limites nesse nível de desvios da gaussianidade preditos pelos diferentes modelos inflacionários. Além disso, esses desvios são caracterizados por formas específicas dependendo do modelo. No caso da

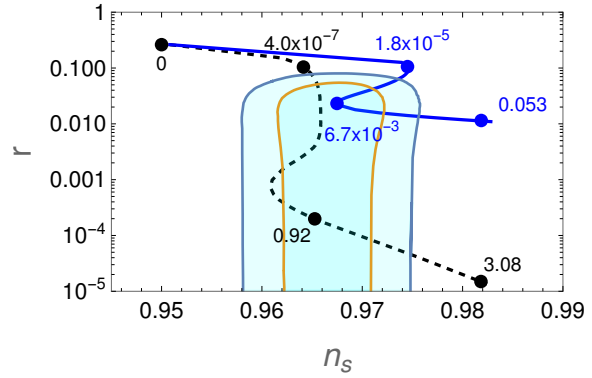


Figura 2: O índice espectral n_s e a razão entre as amplitudes tensorial e escalar, $r = A_t/A_s$, no plano (n_s, r) para diferentes valores da razão Q entre a dissipação Υ na inflação quente e o parâmetro de Hubble H , $Q = \Upsilon/(3H)$, o qual é calculada na escala de base k_* (os números próximos de cada ponto em cada curva indicam os valores correspondentes de Q) e no caso de um potencial de forma quártica para o inflaton. A linha sólida azul é o caso de um modelo de inflação quente cuja dissipação Υ tem uma dependência cúbica na temperatura [13], enquanto que a linha tracejada preta é para um modelo de inflação quente com dissipação com dependência linear na temperatura [15]. Os contornos são os dados observacionais obtidos da colaboração Planck, correspondendo aos níveis de confiança de 68% e 95%, respectivamente (ver a Ref. [17] para maiores detalhes). Note que o valor indicado com $Q = 0$, na parte de cima esquerda da figura, corresponde a previsão da inflação fria e, portanto, está excluído dos dados observacionais.

inflação quente, as formas preditas são distintas daquelas originárias na inflação fria (para detalhes ver por exemplo a Ref. [18]). Isso provê mais uma maneira de eventualmente distinguir a inflação quente da fria por meio de futuras medições mais precisas da RFMC [19,20] e em particular dos desvios da gaussianidade das perturbações primordiais.

5 Inflação quente e seu possível papel em teorias originárias de gravitação quântica

Sabemos que os modelos de física de partículas e teoria quântica de campos atuais devem ser, no máximo, modelos efetivos válidos em escalas de energia abaixo da chamada escala de energia de Planck ($E_{\text{Planck}} \sim 10^{18} \text{ GeV}$). Para energias próximas da escala de Planck espera-se que efeitos quânticos da gravitação sejam importantes o suficiente tal que uma descrição válida da física

de partículas necessariamente dever também incluir tais efeitos. Um dos grandes desafios da física teórica atualmente é exatamente a construção de uma teoria quântica consistente de campos de matéria e gravitação. Um dos mais promissores candidatos para tal teoria é a chamada teoria de cordas. A teoria de cordas é definida em várias dimensões do espaço-tempo, cerca de 10 a 11 dimensões, cujas dimensões extras precisam ser compatificadas de tal forma a teoria resultante ser consistente com nosso Universo de quatro dimensões de espaço-tempo. A forma que tais dimensões extras são compatificadas dão origem a diferentes teorias quântica de campos em quatro dimensões de espaço-tempo a baixas energias (entre as quais, deve surgir o modelo padrão de física de partículas, o modelo de Weinberg-Glashow-Salam). Entretanto, nem todas as teorias quântica de campos acabam caindo em uma dessas teorias de baixas energias advindas da teoria de cordas. As teorias quânticas de campos compatíveis com a teoria de cordas a baixas energias são ditas residirem na planície, enquanto que aquelas que não são compatíveis, são ditas residirem no pântano [21]. Uma das condições preconizadas para que uma dada teoria seja consistente com teoria de cordas (e então com uma teoria de gravitação quântica) é por exemplo que campos escalares não sofram variações maiores que a dada pela escala de Planck. Isso resulta em sérias implicações no contexto da inflação, onde em geral o campo de ínflaton pode ter variações maiores que a escala de Planck, em particular na inflação fria. Já na inflação quente, os efeitos adicionais de fricção causados pela dissipação do ínflaton permitem que essas variações do campo de ínflaton sejam compatíveis com as condições conjecturadas pela teoria de cordas [22]. A melhor compatibilidade da inflação quente como uma teoria efetiva que pode ser advinda de uma teoria de gravitação quântica é certamente um apelo adicional de sua consistência do ponto de vista formal quando comparada com a inflação fria.

6 Conclusões

Entre as diferentes propostas que tentam fazer uma implementação consistente da dinâmica inflacionária dentro do contexto de uma teoria

quântica de campos, a inflação quente é uma das propostas mais promissoras. A inflação quente explora o fato que a dinâmica inflacionária é intrinsecamente um problema de vários campos em interação. A descrição apropriada para tal situação se torna equivalente à encontrada em sistemas de física estatística onde efeitos de dissipação (ou seja, produção de radiação) e flutuações aleatórias estejam presentes. Os efeitos de dissipação e de produção de radiação durante a inflação quente afetam profundamente a dinâmica do campo de ínflaton e suas perturbações, levando a importantes diferenças em suas previsões quando comparadas com aquelas da inflação fria. Adicionalmente, uma série de desenvolvimentos recentes no cenário da inflação quente tem demonstrado como ela pode aliviar uma série de problemas que afetam modelos de inflação fria, mas que são ausentes na inflação quente.

Desde sua conceptualização a mais de 25 anos atrás, a ideia da inflação quente tem evoluído e tornado uma proposta madura de tal forma a prover uma forma de entender melhor e mais consistente, do que na inflação fria, alguns dos mais fundamentais problemas em cosmologia. As ideias no contexto da inflação quente têm se desenvolvido rapidamente nos últimos anos. Tais desenvolvimentos tem acontecido tanto da perspectiva de uma teoria quântica de campos fundamental, mas também de uma variedade de aplicações associadas à mesma, tornando a inflação quente uma área de pesquisa promissora, e com o potencial de fornecer um deslumbramento da física dominante no Universo primordial.

Agradecimentos

O autor tem sua pesquisa financiada por fundos advindos do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo No. 307286/2021-5, e da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), processo No. E-26/201.150/2021.

Sobre o autor

R. O. Ramos (rudnei@uerj.br) é professor titu-

lar do departamento de Física Teórica do Instituto de Física da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), onde leciona e orienta alunos em todos os níveis (graduação, mestrado e doutorado). Atua principalmente nos seguintes temas de pesquisa: teoria quântica de campos à temperatura finita, com ênfase em métodos não perturbativos e dinâmica de campos, com aplicações em inflação, cosmologia em geral, matéria condensada e em física hadrônica.

Referências

- [1] A. H. Guth, *Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems*, *Phys. Rev. D* **23**, 347 (1981).
- [2] 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**(6), 389 (1982).
- [3] A. Albrecht e P. J. Steinhardt, *Cosmology for grand unified theories with radiatively induced symmetry breaking*, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 1220 (1982).
- [4] G. Hinshaw et al., *Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: cosmological parameter results*, *Astrophys. J. Suppl.* **208**, 19 (2013).
- [5] Planck Collaboration, *Planck 2018 results I. Overview and the cosmological legacy of Planck*, *A&A* **641**, A1 (2020).
- [6] J. Martin, C. Ringeval e V. Vennin, *Encyclopaedia inflationaris*, *Phys.Dark Univ.* **5-6**, 75 (2014).
- [7] A. Berera, *Warm inflation*, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3218 (1995). [ArXiv:astro-ph/9509049](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9509049).
- [8] *Brownian motion*, Wikipedia. Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Brownian_motion, acesso em jul. 2023.
- [9] M. Gleiser e R. O. Ramos, *Microphysical approach to nonequilibrium dynamics of quantum fields*, *Phys.Rev. D* **50**, 2441 (1994). [ArXiv:hep-ph/9311278](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9311278).
- [10] A. Berera, *The warm inflationary universe*, *Contemp. Phys.* **47**, 33 (2006). [ArXiv:0809.4198](https://arxiv.org/abs/0809.4198).
- [11] A. Berera, I. G. Moss e R. O. Ramos, *Warm inflation and its microphysical basis*, *Rept. Prog. Phys.* **72**, 026901 (2009). [ArXiv:0808.1855](https://arxiv.org/abs/0808.1855).
- [12] V. Kamali, M. Motaharfar e R. O. Ramos, *Recent developments in warm inflation*, *Universe* **9**, 124 (2023).
- [13] S. Bartrum et al., *The importance of being warm (during inflation)*, *Phys. Lett. B* **732**, 116 (2014).
- [14] M. Benetti e R. O. Ramos, *Warm inflation dissipative effects: predictions and constraints from the Planck data*, *Phys. Rev. D* **95**, 023517 (2017). [ArXiv:1610.08758](https://arxiv.org/abs/1610.08758).
- [15] M. Bastero-Gil et al., *Warm little inflaton*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 151301 (2016).
- [16] M. Bastero-Gil et al., *Towards a reliable effective field theory of inflation*, *Phys. Lett. B* **813**, 136055 (2021).
- [17] Planck Collaboration, *Planck 2018 results. X. Constraints on inflation*, *A&A* **641**, A10 (2020). [ArXiv:1807.06211](https://arxiv.org/abs/1807.06211).
- [18] M. Bastero-Gil et al., *Theory of non-Gaussianity in warm inflation*, *JCAP* **12**, 008 (2014). [ArXiv:1408.4391](https://arxiv.org/abs/1408.4391).
- [19] The CMB-S4 Collaboration, *Snowmass 2021 CMB-S4 white paper* (2022). [ArXiv:2203.08024](https://arxiv.org/abs/2203.08024).
- [20] C. L. Chang, *Snowmass 2021 cosmic frontier: Cosmic microwave background measurements white paper* (2022). [ArXiv:2203.07638](https://arxiv.org/abs/2203.07638).
- [21] C. Vafa, *The string landscape and the swampland* (2005). [ArXiv:hep-th/0509212](https://arxiv.org/abs/hep-th/0509212).
- [22] M. Motaharfar, V. Kamali e R. O. Ramos, *Warm inflation as a way out of the swampland*, *Phys. Rev. D* **99**, 063513 (2019). [ArXiv:1810.02816](https://arxiv.org/abs/1810.02816).