

Nucleossíntese primordial: primeiros instantes após o big bang

Marlete Assunção

Universidade Federal de São Paulo

Resumo

A nucleossíntese primordial é o tema central deste artigo que descreve a evolução do universo desde a sua origem até os 3 primeiros minutos após o *big bang*. O universo é caracterizado como um caldeirão de partículas. À medida em que o universo se expande e a temperatura diminui, ocorre uma competição entre a criação e a aniquilação das partículas, levando à formação dos primeiros núcleos leves, como hidrogênio, deutério, trítio, lítio, berílio e boro. A formação destes núcleos de massas leves é apresentada sob o ponto de vista da Física Nuclear.

Abstract

Primordial nucleosynthesis is the central theme of this article that describes the evolution of the universe from its origin to the first 3 minutes after the big bang. The universe is characterized as a cauldron of particles. As the universe expands and temperature decreases, a competition takes place between the creation and annihilation of particles, leading to the formation of the first light nuclei, such as hydrogen, deuterium, tritium, lithium, beryllium and boron. The formation of these nuclei is presented from the point of view of Nuclear Physics.

Palavras-chave: nucleossíntese, nucleossíntese primordial, *big bang*.

Keywords: nucleosynthesis, primordial nucleosynthesis, big bang.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v4n2.42306](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v4n2.42306)

1 Introdução

O Modelo Padrão da cosmologia descreve um universo em expansão no presente e um universo primordial extremamente denso e quente no passado. A delimitação desse modelo é obtida por meio de sua extrapolação, a qual se depara com uma singularidade matemática.¹ De maneira simples, o *big bang* pode ser visto como o próprio Modelo Padrão. Por isso, o entendimento do início do universo está além do que a ciência pode explicar hoje.

As estimativas baseadas nesse Modelo Padrão sugerem que o universo tem aproximadamente 14 bilhões de anos. Remontando um universo primordial com uma temperatura de cerca de 10^{32} K (aproximadamente 100.000 bilhões de bilhões de bilhões de Kelvin) nos pouquíssimos segundos logo após o *big bang*. Nesse curto intervalo de tempo, a matéria e a energia estavam concentra-

das num volume ínfimo, e se confundiam. A consequência disso foi um universo primordial muito denso e exageradamente quente. Essas condições extremas afetaram o espaço-tempo,² ou seja, as dimensões físicas expandiu-se exponencialmente em um curto período de tempo.

Os trabalhos de Albert Einstein, Alexander Friedmann, Georges Lemaître e Edwin Hubble (que dá nome ao Telescópio Espacial Hubble, em funcionamento há mais de 30 anos), entre outros cientistas, contribuíram sobremaneira para o entendimento da evolução do universo. Hubble, motivado por seu interesse em astronomia, dedicou-se intensamente à observação do comportamento das galáxias, utilizando o telescópio do Observatório Mount Wilson, nos Estados Unidos. O conjunto dessas observações confirmou que a luz emanada das nebulosas sofria um deslocamento

¹O termo “singularidade” é frequentemente utilizado para descrever pontos nos quais as equações físicas se tornam indefinidas, especialmente no contexto da Teoria da Relatividade e da cosmologia

²A Teoria da Relatividade introduziu a ideia de que o espaço e o tempo são interligados e inseparáveis, formando uma única entidade chamada espaço-tempo. Isso significa que eventos não acontecem apenas em um lugar no espaço, mas também em um momento no tempo, com as relações entre essas coordenadas sendo não triviais.

para o comprimento de onda do vermelho. Esse deslocamento para o vermelho é conhecido como *redshift* em astronomia.

Em 1929, Hubble publicou um artigo sobre o comportamento linear da distância (d), de nebulosas em relação à Terra, em função da sua velocidade (v), de afastamento. Essa relação é conhecida como Lei de Hubble ($v = H_0 \times d$), onde H_0 é a constante de Hubble. Alguns anos mais tarde, pôde-se compreender que o deslocamento para o vermelho é devido o afastamento das nebulosas em relação à Terra, causado por uma expansão do universo que Friedmann já havia demonstrado ser a solução possível da Teoria da Relatividade Geral. Neste ponto, recomenda-se uma leitura da seção temática do Cadernos de Astronomia intitulada Universo em Expansão: Centenário do Modelo Cosmológico de Friedmann, em especial, o artigo “Notas para uma história da cosmologia entre as décadas de 1910 a 1930” [1].

2 Os primeiros instantes

Os primeiros instantes do universo primordial continuam a desafiar a ciência contemporânea. A compreensão desses instantes requer ainda dados experimentais e observacionais para ser constituída como uma teoria amplamente aceita na comunidade científica. Para estes primeiros instantes, vamos mostrar uma trajetória térmica e temporal ainda especulativa sobre o universo primordial. Nesse cenário, a aplicabilidade da Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein ainda não se aplica devido à proeminência dos fenômenos quânticos. Além disso, do ponto de vista da Física das Partículas Elementares considera-se que as quatro forças fundamentais (gravitacional, eletromagnética e as duas forças nucleares, forte e fraca) poderiam estar unificadas [2] nesses primeiros instantes. Com essas ressalvas podemos dizer que logo no início, até 10^{-43} s, o universo encontrava-se na chamada Era de Planck. Nesses primeiros instantes, a temperatura era de 10^{32} K [3].

Entre 10^{-43} e 10^{-36} s, na era conhecida como *Grand Unification Epoch* (Era da Grande Unificação), o universo já estava mil vezes mais frio e se encontrava a uma temperatura de aproximadamente 10^{29} K. Nessa fase, embora ainda muito

quente, o universo já havia se resfriado suficientemente para que a força gravitacional se separasse das outras três forças fundamentais, evidenciando o aparecimento dos grávitons.³ A partir desse ponto, o modelo do universo passa a ser descrito pela Teoria Geral Unificada (GUT). Essa teoria ainda não possui evidências científicas sólidas para a sua comprovação. Muitos cientistas associam o surgimento das primeiras partículas elementares a essa fase [3].

Após o período da Grande Unificação, o universo entra na época da Inflação, que vai até 10^{-32} s. Nessa fase, o tamanho do universo aumenta rapidamente. O Modelo da Inflação admite que o universo se expande bruscamente, causando a distorção do espaço-tempo, tornando possível alcançar velocidades maiores que a da luz [3]. A expansão do universo ocorre de maneira homogênea em todas as direções, enquanto a temperatura passa de aproximadamente 10^{28} K para 10^{22} K [4].

Durante a época inflacionária há também o início da época eletrofraca, que se estende até 10^{-12} s. Nesse período, o universo em expansão experimenta uma temperatura de aproximadamente 10^{15} K o que leva à separação entre as forças forte e a eletrofraca. Em decorrência das alterações térmicas e energéticas do universo primitivo ocorre uma quebra espontânea de simetria, mediada pelo campo de Higgs [5]. Como resultado dessa quebra, além do bóson de Higgs,⁴ os bósons W e Z⁵ responsáveis pelas interações fracas, adquirem massa, enquanto o fóton, que é o mediador da interação eletromagnética, permanece sem massa. Simultaneamente, a intensidade da força forte começa a diminuir conforme o avanço do processo de expansão e de resfriamento do uni-

³Os grávitons são partículas elementares responsáveis pela interação gravitacional, previstas no contexto da teoria quântica. Essas partículas ainda não foram detectadas e continuam sendo apenas uma previsão teórica.

⁴O bóson de Higgs é uma partícula prevista teoricamente e que teria papel preponderante na criação das massas. Ela foi descoberta em 2012 por meio de um experimento realizado no *Large Hadron Collider* (LHC), o maior acelerador de partículas do mundo, localizado na fronteira entre a França e a Suíça.

⁵As partículas W e Z são conhecidas como bósons intermediários foram identificados, experimentalmente na década de 1980 no Acelerador de Partículas do CERN. Em 2008, a capacidade desse acelerador foi ampliada com a construção do LHC.

verso.

Após a época eletrofraca, segue-se a época dos Quarks, que dura até 10^{-5} s. Nesse período, o universo possui uma temperatura entre 10^{15} e 10^{12} K, permitindo que as quatro forças fundamentais atuem de forma independente. Os quarks e suas anti-partículas, os antiquarks (quarks e antiquarks possuem spin semi-inteiro),⁶ colidem e se aniquilam a taxas aproximadamente iguais. Isso tem relação com o processo que leva à predominância da matéria sobre antimatéria no universo (para compreender melhor esse assunto, veja o artigo sobre Bariogênese, publicado nesta mesma Seção Temática). Nesse período os chamados léptons, partículas leves, em comparação com os bósons (em grego, a palavra lépton significa pequeno e, até 2001, era usada para indicar um centavo da moeda local), como elétrons, múons e taus, passam a existir livremente.

Logo após o *big bang*, em questão de milissegundos, o universo passa a ter uma abundância de quarks preenchendo o espaço, criando um tipo de “sopa” densa de matéria, com temperaturas extremamente elevadas. Essa sopa primordial é composta por quarks, juntamente com glúons.⁷ Em condições extremas, quarks e glúons estão ligados fracamente, o que permite sua livre movimentação, formando o que chamamos de plasma de quarks e glúons [6]. Os quarks interagem com os glúons, sendo que os glúons, que carregam a força forte, mantêm os quarks unidos. Ao contrário dos fótons, os glúons possuem carga,⁸ o que explica sua interação com os quarks [6].

Entre o intervalo de 10^{-5} até 1 s, a época dos Hádrons, o universo atinge a temperatura de 10^{10} K. Sob essas condições, os quarks interagem entre eles e com suas antipartículas (os antiquarks), e se inicia a formação de hádrons. Existem dois tipos principais de hádrons: os bárions e os mésons.

⁶O conceito de spin é relativístico e está além do escopo deste artigo. Entretanto, ele pode ser compreendido como o análogo clássico do momento angular de uma esfera que gira em torno de um eixo que passa por seus polos - embora um quark não seja, de fato, uma esfera

⁷Os glúons são as partículas responsáveis pelas interações fortes, que mantêm os quarks unidos. Eles foram detectados pela primeira vez em 1979, no laboratório DESY, na Alemanha.

⁸Os fótons não possuem carga elétrica e nenhum outro tipo de carga. Por sua vez, os glúons possuem um tipo de carga só deles, que foi designada com nomes de cores, mas que não tem relação com as cores do espectro visível.

Quando três quarks se combinam, formam um bárion, e quando três antiquarks se combinam, formam um antibárion. Por exemplo, o próton é um bárion, e ele é composto por três quarks: dois quarks *up* e um quark *down*. Os mésons são formados por um quark e um antiquark que se mantêm ligados graças a força forte [5]. Os mésons mais leves têm uma vida da ordem de nanossegundos (10^{-9} s), enquanto os mais pesados, de picossegundos (10^{-12} s).

3 A criação dos elementos de massas leves

3.1 Nucleossíntese primordial: os ingredientes fundamentais

Ao observar as estrelas e sua composição química, as investigações científicas apontam que muitos dos elementos químicos presentes em tudo ao nosso redor, inclusive em nós mesmos, tiveram origem nos primeiros minutos após o *big bang*. O Cosmos encontrava-se repleto de partículas subatômicas e com uma intensa radiação. Neste cenário primitivo, as sub-partículas permaneciam estáveis por um curto período de tempo, mantendo-se em equilíbrio térmico momentâneo com os fótons de altas energias. À medida em que a temperatura diminuía para cerca de 10^{12} K, apenas neutrinos (ν),⁹ antineutrinos ($\bar{\nu}$), elétrons, pósitrons (e^+)¹⁰ e fótons continuavam a participar do processo de criação-aniquilação.

Neste ambiente, as interações dos prótons e nêutrons com os antineutrinos e neutrinos, respectivamente, estão representadas pelas reações

$$\bar{\nu} + p \rightleftharpoons e^+ + n, \quad (1)$$

$$\nu + n \rightleftharpoons e^- + p. \quad (2)$$

No universo primordial, à temperatura de 10^{12} K, a quantidade de prótons e nêutrons era quase igual. Porém, à temperatura de $T = 10^9$ K, a conversão de nêutrons em prótons se tornou mais eficiente do que a conversão de prótons em nêutrons. Isso ocorreu porque a maioria dos fótons não possuía energia suficiente para criar pares

⁹Os neutrinos são partículas de carga elétrica zero e de massa pequena ou nula.

¹⁰O pósitron é a antipartícula do elétron, que possui as mesmas massa e carga elétrica do elétron. O sinal da carga é positivo.

elétron-pósitron, desequilibrando a proporção entre fótons e essas partículas. A impossibilidade da reversão da reação levou ao consumo dos pósitrons, resultando em um excesso de elétrons. Essas mudanças afetaram a densidade e a dinâmica do universo, acelerando seu resfriamento.

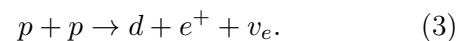
A medida em que o universo se expandia, a temperatura diminuía mais ainda. Para se ter uma ideia, em aproximadamente 380 mil anos após o *big bang*, a temperatura havia caído para aproximadamente 3.000 K, favorecendo energeticamente a formação de átomos de hidrogênio (um próton capturando um elétron). No que diz respeito aos fótons, eles frequentemente colidiam com os elétrons livres. Com a redução do número de elétrons livres no universo, os fótons passam a se propagar livremente dando origem a chamada radiação cósmica de fundo. Quando esses fótons foram liberados, o universo passou de um estado opaco a um estado transparente. Hoje, essa radiação é detectada pelo Cosmos na faixa das microondas, espalhada em todas as direções, com intrigante uniformidade, conhecida como radiação cósmica de fundo. Essa radiação foi prevista teoricamente por George Gamow, Ralph Alpher e Robert Herman em 1948. No entanto, somente em 1965, os radioastrônomos Arno Penzias e Robert Woodrow Wilson a detectaram enquanto trabalhavam para reduzir os ruídos das antenas do Laboratório Bell [7]. Eles perceberam que não importava para qual direção eles apontassem as antenas, o ruído estava sempre presente. Essa radiação é considerada uma relíquia do *big bang* [2]. Apesar da origem da matéria ter ocorrido nos primeiros instantes após o *big bang*, foi somente com a redução severa da densidade de radiação que a matéria começou a se agrupar sob a influência da gravidade, eventualmente formando estruturas observáveis no universo, tais como galáxias, planetas e estrelas [2, 7].

3.2 Cadeias de próton-próton

As reações nucleares desempenham um papel fundamental na produção de energia e na formação dos elementos químicos no universo. Com a redução da temperatura no universo primordial, e a radiação transitando mais livremente, a influência da gravitação tornou-se relevante. Assim, conforme o universo continuou a expandir

e resfriar, regiões de maior densidade de matéria começaram a se agrupar devido à atração gravitacional. Nas regiões mais densas, por sua vez, a matéria é atraída e comprimida pela gravidade. Isso ocorre porque a energia potencial gravitacional é convertida em energia cinética à medida que as partículas se movem mais rapidamente devido à atração gravitacional mútua. O resultado desse processo é um aumento na temperatura nesses locais específicos do universo. Ainda nessas regiões, as colisões entre as partículas tornam-se mais frequentes, e energéticas o suficiente para iniciar os processos de fusão nuclear. Esse fenômeno de fusão nuclear foi explicado graças à descoberta do efeito de tunelamento quântico [2, 8].¹¹ Também, é importante mencionar que o avanço no entendimento dos mecanismos de fusão nuclear foi impulsionado pelo forte interesse na aplicabilidade da elevada quantidade de energia gerada nesse tipo de reação.

Em 1929, Atkinson e Houtermans propuseram uma explicação para a queima do hidrogênio. Nesses primeiros instantes do universo, a queima de hidrogênio ocorreu principalmente seguindo a Cadeia Próton-Próton I (PP I). Durante uma colisão, dois prótons (núcleos de hidrogênio) se fundem para formar um núcleo de deutério (um próton e um nêutron), liberando um pósitron e um neutrino com uma energia acima de 0,22 MeV, representada pela reação



Esses neutrinos são identificados como neutrinos eletrônicos (ν_e), que estão associados ao decaimento beta em Física Nuclear.¹²

Quando um elétron e um pósitron colidem devido à atração de suas cargas opostas, ocorre o fenômeno conhecido como aniquilação elétron-pósitron. Nesse processo, a massa de ambos é convertida em energia, seguindo a famosa equação de Einstein, $E = mc^2$, onde E é chamada de

¹¹Numa colisão nuclear clássica, a energia cinética da partícula deve estar acima da energia potencial da barreira coulombiana. Na Mecânica Quântica, a função de onda se estende para dentro da barreira do potencial, e o resultado é que a partícula, mesmo sem energia cinética suficiente, pode penetrar na barreira.

¹²O decaimento beta é um processo em que um núcleo instável pode se transformar em outro núcleo, emitindo uma partícula beta (β), alterando o número de prótons e nêutrons, sem variar o número de massa. A partícula β pode ser um elétron ou um pósitron.

energia de repouso da partícula, m é sua massa, e c é a velocidade da luz no vácuo. A energia resultante de 1,02 MeV é liberada sob forma de fótons de alta energia, chamados de raios- γ ,¹³ conforme a reação

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma. \quad (4)$$

A reação de fusão (3) depende da conversão de um próton em um nêutron, o que é um processo nuclear bastante lento. Além disso, essa reação pode ser vista como o ponto de partida de três cadeias da reação próton-próton (I, II e III), fundamentais na formação dos elementos de massas leves do universo primitivo. O deutério produzido pode interagir com nêutrons,

$$d + n \rightarrow {}^3\text{H} + \gamma, \quad (5)$$

ou ainda com outro núcleo de deutério,

$$d + d \rightarrow {}^3\text{H} + p, \quad (6)$$

com ambas as reações acima resultando em um núcleo de trítio ${}^3\text{H}$.

Na cadeia de próton-próton I (PP I), o ambiente primitivo, inundado de prótons e com núcleos de deutério, possibilitou a interação de um núcleo de deutério com um próton, produzindo um núcleo de hélio-3 (dois prótons e um nêutron), com liberação de energia. A energia liberada está representada pelo chamado valor de Q da reação,

$$d + p \rightarrow {}^3\text{He} \quad (Q = 5,493 \text{ MeV}). \quad (7)$$

O aumento de hélio-3 deu lugar à fusão de dois núcleos de hélio-3 para formar o hélio-4 conforme a reação (8) abaixo. Este núcleo composto por 2 prótons e 2 nêutrons é conhecido como partícula alfa e desempenha um papel importante nas nucleossínteses primordial e estelar (síntese dos elementos químicos nas estrelas).

$${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p \quad (Q = 12,859 \text{ MeV}). \quad (8)$$

Nessa reação, são liberados 2 prótons e um excedente de energia. Esse processo é predominante a temperaturas em torno de 10 a 14 $\times 10^6$ K [2].

Às temperaturas de 14 a 23 $\times 10^6$ K, a fusão nuclear de dois núcleos de hélio-4 desencadeiam

¹³Um raio- γ é radiação eletromagnética altamente energética, com comprimentos de onda curtos e frequências altas. São extremamente penetrantes, e interagem fortemente com a matéria.

novas reações para a produção dos núcleos de berílio-7,

$${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma \quad (Q = 1,596 \text{ MeV}), \quad (9)$$

e de lítio-7 (resultado da captura de elétron pelo ${}^7\text{Be}$),

$${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e \quad (Q = 0,80 \text{ MeV}), \quad (10)$$

que produzem mais hélio-4,

$${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} \quad (Q = 17,347 \text{ MeV}). \quad (11)$$

Essa sequência de reações é conhecida como cadeia PP II.

A formação do berílio-7 a partir da reação (9) pode seguir outro caminho, para compor a chamada cadeia próton-próton III (PP III), a temperaturas acima de 23 $\times 10^6$ K. A primeira reação dessa cadeia produz um núcleo de boro-8,

$${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma \quad (Q = 0,135 \text{ MeV}), \quad (12)$$

que é muito instável, liberando elétrons e neutrinos,

$${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^- + \nu_e \quad (Q = 7,200 \text{ MeV}), \quad (13)$$

para decair rapidamente em duas partículas alfa,

$${}^8\text{Be}^* \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} \quad (Q = 0,095 \text{ MeV}). \quad (14)$$

A nucleossíntese primordial ocorreu nos primeiros instantes do *big bang*, criando núcleos leves, que são os elementos mais abundantes na natureza. Os mecanismos de formação e de consumo dos elementos de massas leves são investigados a partir dos cálculos das suas abundâncias e taxas de reação, considerando as temperaturas típicas da nucleossíntese primordial [2, 8].

Nas estrelas, a fusão nuclear passou a ter predominância na formação de elementos de massas intermediárias (carbono, nitrogênio e oxigênio, dentre outros) e na explicação da produção de energia. Quanto aos núcleos mais pesados (ferro, níquel e ouro, por exemplo), estes estão associados diretamente à evolução das estrelas massivas, que podem colapsar no estágio final da sua vida. Tal colapso é impulsionado pela exaustão do combustível nuclear no núcleo dessas estrelas.

Durante a maior parte de sua vida, uma estrela está em equilíbrio termodinâmico, mantendo seu

tamanho e temperatura através da fusão nuclear. No entanto, uma vez que o núcleo fique quase completamente composto de ferro, a fusão não poderá mais sustentar a pressão gravitacional. O equilíbrio é rompido, e a estrela começa a entrar em colapso. Tal colapso gera uma onda de choque, que se propaga para fora da estrela, atravessando suas camadas externas. A onda de choque comprime o material das camadas externas, e essa compressão gera calor e uma explosão violenta, conhecida como supernova. A explosão inunda o Cosmos com uma diversidade de elementos sintetizados ao longo da vida da estrela.

Próximo a uma supernova ou devido a uma perturbação gerada a partir de ondas de choque decorrentes de colisões entre supernovas, uma nuvem cósmica de gás e poeira, chamada nebulosa solar, teve sua densidade de matéria aumentada em sua região central, incorporando inclusive elementos pesados. O colapso subsequente dessa nebulosa, desencadeado por outros fenômenos bem conhecidos dos cientistas, esclarece a formação na Terra há cerca de 4,6 bilhões de anos, além da presença dos elementos pesados [9, 10].

4 Conclusões

Neste artigo, a história do universo foi relatada, seguindo escalas de tempo e temperatura. Grande parte dessa narrativa é conhecida e comprovada experimentalmente, enquanto outros aspectos estão em construção por meio de vários estudos em Astronomia e diversas áreas da Física, como Astrofísica, Cosmologia, Física de Partículas Elementares, Física Gravitacional e Física Nuclear.

A nucleossíntese primordial é apenas um dos muitos fenômenos que ocorreram ao longo da história do universo. Trata-se de um processo essencial na formação dos elementos que possibilitam e sustentam a vida na Terra. No que diz respeito às cadeias próton-próton, elas também ocorrem nas estrelas. Um exemplo é o Sol, que está experimentando a cadeia PP I neste exato instante. Essas cadeias permitiram a criação dos primeiros elementos de massas leves e atuam como catalisadores para outras reações que levam à formação dos elementos intermediários e pesados.

5 Agradecimentos

Agradeço a Nadja Simão Magalhães, do Departamento de Física da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), e a Francisco Silveira, do Centro de Ciências Naturais e Humanas da Universidade Federal do ABC (UFABC), pelas sugestões sobre o conteúdo deste artigo. Ao Corpo Editorial dos Cadernos de Astronomia pelo convite e trabalho de revisão.

Sobre a autora

Marlete Assunção (massuncao@unifesp.br) é Doutora em Física pela Universidade de São Paulo (USP) com pós-doutorados em Astrofísica Nuclear no Centre de Spectrométrie Nucleaire et Spectrométrie de Masse (CSNSM-CNRS), em Orsay na França, e no Laboratório Pelletron-Linac do Instituto de Física da USP (IFUSP) em São Paulo. Atualmente é Professora Associada IV do Departamento de Física da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), no Campus Diadema. Faz parte do grupo Núcleos Exóticos e Astrofísica Nuclear (NEAN), atuando como Professora Pesquisadora no Departamento de Física Geral do IFUSP. Possui experiência na área de Física Nuclear, particularmente, em reações nucleares de interesse astrofísico, tendo publicado mais de 50 artigos científicos ao longo de sua carreira.

Referências

- [1] A. A. P. Videira e C. L. Vieira, *Notas para uma história da cosmologia entre as décadas de 1910 e 1930*, *Cadernos de Astronomia* **3**(1), 10 (2022).
- [2] C. E. Rolfs e W. S. Rodney, *Cauldrons in the Cosmos* (University of Chicago Press, Chicago, 1988).
- [3] E. Harrison, *Cosmology: The Science of the Universe* (Cambridge University Press, Cambridge, 2000), 2^a ed.
- [4] A. R. Liddle e D. H. Lyth, *Cosmological Inflation and Large Scale Structure* (Cambridge University Press, Cambridge, 2000).

- [5] F. Close, *Particle Physics: A very Short Introduction* (Oxford University Press, Oxford, 2004).
- [6] M. Y. Han, *Quarks and Gluons: A Century of Particle Charges* (World Scientific Publishing, Singapore, 1999).
- [7] P. D. Naselsky e D. I. Novikov, *The Physics of the Cosmic Microwave Background* (Cambridge University Press, Cambridge, 2016).
- [8] D. D. Clayton, *Principles of stellar evolution and nucleosynthesis*. (The University of Chicago Press, Chicago, 1988).
- [9] A. G. W. Cameron, *Origin of the Solar System*, [Annual Review of Astronomy and Astrophysics](#) **26**(1), 441 (1988).
- [10] M. M. Woolfson, *Origin of the Solar System*. (Imperial College Press, London, 2000).