

Universidade Estadual de Campinas

Possibilidade de existência de vida no universo jovem

Instituto de Física Gleb Wataghin

Orientador: Pedro Cunha de Holanda

e-mail: holanda@ifi.unicamp.br



Aluno: João Vitor Chiaramonte Rocha

e-mail: joao_v.rocha@hotmail.com

Resumo

Em um estudo recente^[1], verifica-se a hipótese de que em tempos remotos, quando o Universo datava de 10-17 milhões de anos, havia um ambiente propício para o surgimento da vida.

Estudos revelaram neste Universo Jovem ($100 \leq (1 + z) \leq 137$), as primeiras estrelas começaram a colapsar em supernovas, criando os elementos químicos necessários para a formação dos primeiros planetas rochosos. Além disso, a temperatura da radiação cósmica de fundo permanecia entre 273-373K, permitindo que estes planetas possuíssem água na forma líquida, condicionando-os a serem propícios para a existência de vida da maneira como a conhecemos.

Através do estudo de conceitos e teorias, abrangendo áreas como física de partículas, relatividade geral e mecânica quântica, será discutida a maneira como o universo se formou e evoluiu, e a compatibilidade do modelo cosmológico com a tendência do surgimento da vida. Serão, ao final do projeto de pesquisa, enfatizadas principalmente nas perturbações na métrica no universo primordial, e sua evolução até a não-linearidade que resultará na formação destas estrelas.

Introdução

Ao se tratar da existência de vida no Universo atual, comumente usamos uma definição de zona habitável que trata da distância a uma fonte luminosa (estrela), de forma que a energia dela

proveniente mantenha a superfície de um planeta rochoso a aproximadamente 300K. Tal temperatura permite a existência de água no estado líquido, possibilitando a vida do modo que a conhecemos. Entretanto, estudos indicam que no Universo Jovem, entre 10-17 milhões de anos após o Big Bang, a radiação cósmica de fundo mantinha a temperatura em torno de $272,6K \cdot [(1+z)/100]$, permitindo que os planetas fossem habitáveis independentemente de suas distâncias a uma fonte de energia.

Combinando as ideias da formação de planetas rochosos e a possível existência de água nos mesmos, bem como outros conceitos mais complexos, Abraham Loeb tenta demonstrar em seu artigo “The Habitable Epoch of the Early Universe”^[1], que em épocas remotas, todo Universo era habitável. O objetivo desse projeto é entender todos os conceitos por trás do artigo, bem como confirmar sua ideia principal.

Objetivos

Para compreender os argumentos apresentados no artigo recente^[1], é necessário o conhecimento em áreas como Relatividade Geral, Cosmologia, Astrofísica e Física de Partículas. O objetivo fundamental deste projeto é desenvolver os conhecimentos necessários para avaliar criticamente as conclusões apresentadas.

Resumo das atividades

As atividades de Iniciação Científica ocorreram de acordo com o proposto inicialmente, ou seja, estudaram-se os tópicos necessários a partir da leitura de livros e artigos relacionados, aprofundando-se no estudo de cosmologia para melhor entendimento da evolução do universo, assim como o estudo de aspectos astrofísicos para a compreensão do processo de formação de galáxias e estrelas, e seu papel no Universo Jovem que possa influenciar na possibilidade de existência de vida neste.

Discussões e Conclusões

Antes de ser analisado qualquer aspecto quantitativo acerca da evolução do universo é de grande importância tratar de um ponto qualitativo que será o norte de todos os tópicos de estudo a serem desenvolvidos a seguir. Devido a sua relevância, tal afirmação é denominada “Princípio Cosmológico” ou “Princípio Copernicano” e alega que o universo, se visto em largas escalas, deve ser homogêneo e isotrópico, portanto, mantendo as mesmas características em qualquer ponto ou direção em que se analise.

Expansão do Universo^[2]

Inicialmente ao se tratar da expansão do universo é importante citar os trabalhos do astrônomo Edwin Hubble que na primeira metade do século XX, analisou o comportamento de cerca de 1355 galáxias. A partir dos dados obtidos, Hubble pode notar que quanto mais longe um corpo estivesse, maior era sua velocidade de recessão em relação a nós em uma proporção linear, chegando à equação abaixo, conhecida como “Lei de Hubble”, em que H_0 denomina-se constante de Hubble.

$$\vec{v} = H_0 \vec{r}$$

A medida das velocidades de recessão das galáxias feita por Hubble baseava-se em algo semelhante ao efeito Doppler, entretanto neste caso para ondas luz, em que se analisava o espectro de emissão de alguns elementos das galáxias e se estivesse em recessão em relação a nós, haveria uma tendência de que o comprimento de onda observado fosse ao vermelho, devido a uma redução em sua frequência, denominando esse efeito como “redshift”, representado pela letra z . Com isso, a partir das seguintes equações torna-se possível mensurar a velocidade de recessão das galáxias.

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{emi}}{\lambda_{emi}} \text{ e } z = \frac{v}{c}$$

Desse modo, nota-se que a expansão é mais proeminente em largas escalas e não viola o Princípio Cosmológico, contudo, é compreensível que indo além no tempo, mais o universo se expandirá, portanto, é de se imaginar que voltando suficientemente ao passado, tudo pudesse estar concentrado em um único ponto, fundamentando de certo modo, o modelo cosmológico do Big-Bang.

A equação de Friedmann [2] é considerada a mais importante da cosmologia, uma vez que descreve a expansão do universo. O fator “ a ”, denominado “fator de escala do Universo”, varia unicamente em função do tempo e diz respeito à taxa de expansão universal. Além disso, a constante “ k ”, independente do tempo e espaço, esta relacionada a geometria do universo.

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

De maneira mais cautelosa, olhando a equação de Friedmann, vê-se que não há como resolvê-la sem antes saber descrever como a densidade “ ρ ” dos constituintes do universo varia em relação ao tempo. Para tanto, será envolvido um parâmetro “ p ” de pressão desses componentes e chega-se na relação abaixo, conhecida como equação de fluido:

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) = 0$$

A partir deste ponto, há mais algumas observações que podem ser feitas a partir da Lei de Hubble, pois como a velocidade de recessão pode ser escrita na forma $\vec{v} = \frac{\dot{\vec{r}}}{|\vec{r}|} \vec{r}$ e trata da expansão, podese reescrevê-la usando o fator de escala, chegando que:

$$\vec{v} = \frac{\dot{\vec{r}}}{|\vec{r}|} \vec{r} = \frac{|\dot{a}|}{|a|} \vec{r} \text{ e se } \vec{v} = H \vec{r} \rightarrow H = \frac{\dot{a}}{a}$$

Devido a dificuldades práticas, o valor da constante de Hubble no universo atual é relativamente impreciso, possuindo o seguinte valor: $H_0 = 100 h \text{ Km} \cdot \text{s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, tal que $h = 0,72 \pm 0,08$.

Indo além, pode-se neste instante construir uma associação da expansão com o “redshift”, aplicando a lei de Hubble e pelo efeito Doppler tem-se que:

$$dv = H dr \text{ e } \frac{d\lambda}{\lambda_e} = \frac{dv}{c} \text{ se } d\lambda = \lambda_r - \lambda_e$$

$$\frac{d\lambda}{\lambda_e} = \frac{\dot{a}}{a} \frac{dr}{c} = \frac{\dot{a}}{a} dt = \frac{da}{a} \rightarrow \lambda \propto a$$

Dessa forma, podemos associar a definição de redshift ao fator de escala do universo, sabendo que o subscritos “r” e “e” indicam respectivamente dados no momento da recepção e emissão:

$$1+z = \frac{\lambda_r}{\lambda_e} = \frac{a(t_r)}{a(t_e)}$$

Solução da equação de Friedmann^[2]

Como visto anteriormente, para solução da equação de Friedmann é necessário saber os constituintes do universo, o que de forma prática, diz respeito a encontrar $p \equiv p(\rho)$, denominada equação de estado. Para as seguintes análises assumiremos um universo plano e infinito, o que corresponde a um valor de $k=0$ na equação de Friedmann. Desse modo, consideram-se as seguintes hipóteses:

- Universo composto apenas por matéria:

Tal suposição é a mais simples que pode ser feita e é importante esclarecer que neste ponto considera-se por matéria todo constituinte não relativístico e que possua pressão relativamente nula, $p=0$, portanto, seria o caso, por exemplo, dos bárions (partículas formadas por três quarks dos quais prótons e nêutrons são os únicos estáveis) e elétrons.

Primeiramente, soluciona-se a equação de fluido considerando $p=0$:

$$\dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}}{a} \left(\rho + \frac{p}{c^2} \right) = 0 \rightarrow \dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}}{a} \rho = 0 \leftrightarrow \frac{1}{a^3} \frac{d}{dt} (\rho a^3) = 0 \rightarrow \frac{d}{dt} (\rho a^3) = 0 \therefore \rho a^3 = cte$$

Portanto, $\rho \propto \frac{1}{a^3}$ o que de certo modo é um resultado esperado tendo em vista que a

densidade de matéria cai com o aumento do volume (a^3) universo. Desse modo, sabendo que o

subscrito “0” indica que estão sendo tomados valores do universo atual, substitui-se $\rho = \frac{\rho_0}{a^3}$ na

equação de Friedmann, pois se quer encontrar agora a relação do fator “a” com o tempo:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} \rightarrow \dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3} \frac{\rho_0}{a}$$

Para solução desta equação diferencial, tomou-se o ansatz $a \propto t^q$ e verificou-se que $q=2/3$ seria o único valor que manteria a igualdade. Desse modo, para um universo composto apenas por matéria:

$$a(t) = \left(\frac{t}{t_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

➤ Universo composto apenas por radiação:

Neste caso, consideram-se partículas com movimento relativístico, caso de fótons e neutrinos (partícula com baixíssima interatividade) que possuem pressão de radiação. Assim, de acordo com a mecânica quântica, a equação de estado é $p = \frac{\rho c^2}{3}$.

De maneira análoga a feita anteriormente para a matéria não relativística, trabalha-se inicialmente na solução da equação de fluido:

$$\dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}}{a} \left(\rho + \frac{p}{c^2} \right) = 0 \rightarrow \dot{\rho} + 4 \frac{\dot{a}}{a} \rho = 0 \leftrightarrow \frac{1}{a^4} \frac{d}{dt} (\rho a^4) = 0 \rightarrow \frac{d}{dt} (\rho a^4) = 0 \therefore \rho a^4 = cte$$

Portanto, $\rho \propto \frac{1}{a^4}$, caindo mais rápido que a matéria que é inversamente proporcional ao

aumento do volume. Substituindo $\rho = \frac{\rho_0}{a^4}$ na equação de Friedmann:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} \rightarrow \dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3} \frac{\rho_0}{a^2}$$

Resolvendo novamente com o ansatz $a \propto t^q$, chegou-se que para um universo composto apenas por radiação:

$$a(t) = \left(\frac{t}{t_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

➤ Universo composto por matéria e radiação:

Este é o caso mais geral que se pode tratar e ainda assim é possível se tomar ρ em função do fator de escala “ a ” para ambos constituintes, matéria e radiação, contudo:

$$\rho = \rho_{mat} + \rho_{rad}$$

Desse modo, para que seja contornado o fato de “ a ” possuir um comportamento muito complicado, serão tomados casos de dominância em que um componente se encontra muito mais presente que o outro no universo e o modelo matemático se adequa relativamente bem.

Portanto, iniciando com dominância de radiação, a partir da equação (2) podemos descrever que:

$$a(t) \propto t^{\frac{1}{2}}, \text{ tem-se que: } \rho_{rad} \propto \frac{1}{t^2} \text{ e } \rho_{mat} \propto \frac{1}{a^3} \propto \frac{1}{t^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

Invertendo importância, ou seja, matéria no domínio, escreve-se com base em (1) que:

$$a(t) \propto t^{\frac{2}{3}}, \text{ tem-se que: } \rho_{mat} \propto \frac{1}{t^3} \text{ e } \rho_{rad} \propto \frac{1}{a^4} \propto \frac{1}{t^{\frac{8}{3}}} \quad (4)$$

A partir disso, é importante introduzir um fator denominado “parâmetro de densidade Ω ” que será de grande utilidade para as próximas análises e é definido da seguinte forma:

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$$

Sendo ρ_c , chamado de densidade crítica, um fator variável com o tempo definido pelo valor assumido pela densidade ρ na equação de Friedmann para um universo plano ($k=0$). Com isso, é possível reescrever a equação de Friedmann em função de Ω , chegando a:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2} \text{ e se } \rho_c(t) = \frac{3H^2}{8\pi G} \rightarrow \Omega - 1 = \frac{kc^2}{H^2 a^2}$$

Quando $\Omega=1$ denomina-se densidade crítica, pois o valor de “k” deve ser nulo, implicando em um universo plano e, portanto, esse valor se manterá constante por todo tempo.

É relevante citar também neste ponto do trabalho uma das questões mais enigmáticas da cosmologia que é a constante cosmológica Λ . Einstein, quando desenvolvia seus trabalhos em relatividade geral sugeriu uma alteração nas equações de modo a manter o universo estático, contrabalanceando o fato de que a força gravitacional tenderia a contrai-lo. Na época, esse foi considerado o seu “maior erro”, contudo, a constante cosmológica tem sido utilizada atualmente como uma forma de melhor modelar e compreender a expansão.

Para a avaliação do parâmetro de densidade de matéria atual do universo, Ω_0 , a partir de evidências observacionais, tem-se suposto que a constante cosmológica tem dado grande contribuição para a densidade total. Contudo, outro componente enigmático da cosmologia, a matéria escura, apresenta uma significativa parcela de Ω_0 e sua origem deve-se a análise de gráficos de rotação de galáxias em que se constatou que a matéria bariônica visível não seria capaz de produzir o campo gravitacional notado. Dessa forma, apontou-se que deveria existir algum outro tipo de matéria não luminosa, justificando a denominação “escura”, muito mais densa que a matéria bariônica luminosa capaz de atender aos dados coletados. Por fim, ponderando as considerações tratadas anteriormente chega-se que $\Omega_0 \cong 0,3$ com $\Omega_\Lambda \cong 0,7$ é uma adequada aproximação, obedecendo que $\Omega_0 + \Omega_\Lambda = 1$ para um universo plano.

Radiação C3smica de Fundo e Hist3rico Termal ^[2]

Numa 3poca em que o universo possu3a um milion3simo do tamanho atual, com uma temperatura entorno de 3.000.000K, o cosmos grosseiramente assemelhava-se a uma grande sopa de n3cleos at3micos e el3trons com alta intera33o com f3tons. Isso se justifica uma vez que 3quela temperatura, os f3tons eram altamente energ3ticos, podendo ionizar qualquer 3tomo que porventura se formasse. Conforme o universo expandia e esfriava, os f3tons iam perdendo cada vez mais seu potencial de ioniza33o e de acordo com o efeito fotoel3trico, havia ent3o a possibilidade de forma33o de 3tomos com os el3trons podendo associar-se aos n3cleos at3micos. Este per3odo denomina-se “Dissocia33o” e a partir da3 os f3tons poderiam ent3o viajar sem grandes restri33es por todo o universo, podendo dar origem a “Radia33o C3smica de Fundo”.

Acredita-se que a “Dissocia33o” tenha ocorrido quando o Universo tinha uma temperatura de 3000K, algo entorno de 350.000 anos. A detec33o da “Radia33o C3smica de Fundo” na Terra demonstra que pode ser bem modelada se aproximada a radia33o de corpo negro, desse modo, possui a seguinte distribui33o t3rmica a partir da densidade de energia ϵ :

$$\epsilon_{rad} \equiv \rho_{rad} c^2 = \alpha T^4 \quad (5)$$

Em que $\alpha = 7,565 \times 10^{-16} J m^{-3} K^{-4}$ denominada constante de corpo negro e como visto anteriormente $\rho_{rad} \propto \frac{1}{a^4}$, implicando que:

$$T \propto \frac{1}{a} \quad (6)$$

A partir da equa33o (5) e sabendo que atualmente a temperatura da radia33o c3smica de fundo 3 T=2,725K, 3 poss3vel se encontrar a densidade de energia e, por conseguinte, o par3metro de densidade de f3tons, tal que $\Omega_{rad} = 2,47 \times 10^{-5} h^{-2}$ (se h 3 um fator de imprecis3o na medida H_0). Contudo, para que seja poss3vel o uso das solu33es da equa33o de Friedmann expostas acima, 3 preciso considerar toda constituinte relativ3stico, inclusive neutrinos que ser3o adotados sem massa, chegando que $\Omega_{rel} = 4,15 \cdot 10^{-5} h^{-2}$. Desse modo, tendo por base a defini33o de par3metro de densidade 3 poss3vel construir a seguinte raz3o considerando valores de Ω_{rel} e Ω_{mat} para o universo atual:

$$\frac{\Omega_{rel}}{\Omega_{mat}} = \frac{4,15 \cdot 10^{-5} h^{-2}}{\Omega_0} \frac{1}{a}$$

Olhando a equa33o acima se nota a possibilidade de se encontrar facilmente o valor do fator de escala do universo quando $\Omega_{rel} = \Omega_{mat}$, chegando que:

$$a_{eq} = \frac{4,15 \cdot 10^{-5} h^{-2}}{\Omega_0} \approx \frac{1}{24 \cdot 10^3 \Omega_0 h^2}$$

E se pela equação (6), $T \propto \frac{1}{a}$, encontra-se que:

$$T_{eq} = \frac{2,725}{a_{eq}} = 6,6 \cdot 10^4 \Omega_0 h^2 K \cong 16500K$$

Analisando as conclusões feitas até então, nota-se que é possível se construir um completo histórico termal para o universo. Para tanto, será assumido, como feito até então, um universo plano, $k=0$, com efeitos da constante cosmológica desprezados. Com isso, desconsiderando o fato de que Λ amenizaria a atração gravitacional, a idade do universo será tomada como algo entorno de 12 bilhões de anos ($4 \times 10^{17} s$), o que embora distante dos 13,7 bilhões apresentado na literatura, é possível alcançar dados razoavelmente condizentes em relação a simplificação matemática de se ter $k=0$ e $\Lambda=0$.

Desse modo, associando as equações (4) e (6) pode-se construir a seguinte igualdade considerando um universo com dominância de matéria, ou seja, $T \leq T_{eq} = 16500K$:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{2}{3}} \rightarrow \frac{T}{2,725} = \left(\frac{4 \cdot 10^{17}}{t} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

Portanto, no limite onde $T_{eq} = 16500K$, tem-se que $t_{eq} \cong 10^{12} s$ e a partir das equações (3) e (6) chega-se na seguinte igualdade para um universo com domínio de radiação, ou seja, $T > T_{eq} = 16500K$ e $t < t_{eq} \cong 10^{12} s$:

$$\frac{T}{T_{eq}} = \left(\frac{t_{eq}}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \frac{T}{16500} = \left(\frac{10^{12}}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Tendo por base as equações (7) e (8) pode-se montar o gráfico da Figura 1 que é um histórico termal do universo, ou seja, explicita a relação de temperatura em função do tempo transcorrido após o Big-Bang considerando os períodos de domínio de radiação e também de matéria. A partir deste gráfico, verificam-se alguns pontos importantes tais como o já analisado período de equilíbrio entre matéria e radiação, o período de “Dissociação” em que se acredita ter surgido a radiação cósmica de fundo e também as condições do universo atual com uma temperatura em torno de 3K.

Em especial para esta pesquisa, assinalado em preto no gráfico da Figura 1, está explicitado o ponto no qual a temperatura cósmica de fundo estaria entorno de 300K (interesse desta Iniciação Científica) demonstrando que o universo deveria ter uma idade de $3 \times 10^{14} s$, ou seja, aproximadamente 11 milhões de anos. Esta é uma conclusão importante para a pesquisa pois a partir deste dado, torna-se possível estudar de modo mais objetivo as condições do universo, tais como a formação de estrelas e possíveis planetas rochosos que possam abrigar água em estado líquido.

Acrescenta-se ainda que, abaixo do gráfico da Figura 1 é esboçada uma linha do tempo em que se resume o processo de formação dos elementos com a associação e interação de algumas partículas existentes no universo. Além disso, é importante ressaltar que os dados encontrados, em

especial a idade do cosmos em que haveria uma maior probabilidade de existência de vida, esta em perfeito acordo com a margem de 10-17 milhões de anos estabelecida por Abraham Loeb em seu artigo “The Habitable Epoch of the Early Universe” [1].

Origem da estrutura

Ao longo de toda a argumentação desenvolvida acima se preocupou em manter adequada concordância com o Princípio Cosmológico. Entretanto, analisando em pequenas escalas é inquestionável o fato de que o universo possui inhomogeneidades, já que há a existência de planetas, estrelas e etc. Contudo, mesmo em grandes escalas, percebem-se alguns sinais de que tal princípio não é exato, já que galáxias, por exemplo, não estão distribuídas aleatoriamente pelo espaço, havendo maior probabilidade de se encontrar um galáxia próxima de outra, formando os aglomerados de galáxias. Desse modo, notando que o universo, em largas escalas, não é exatamente homogêneo, é de se suspeitar que também não seja completamente isotrópico o que de fato foi confirmado por dados precisos coletados por diferentes experimentos que apontaram uma pequena anisotropia na radiação cósmica de fundo, algo da ordem de dez micro Kelvin quando analisado em direções opostas.

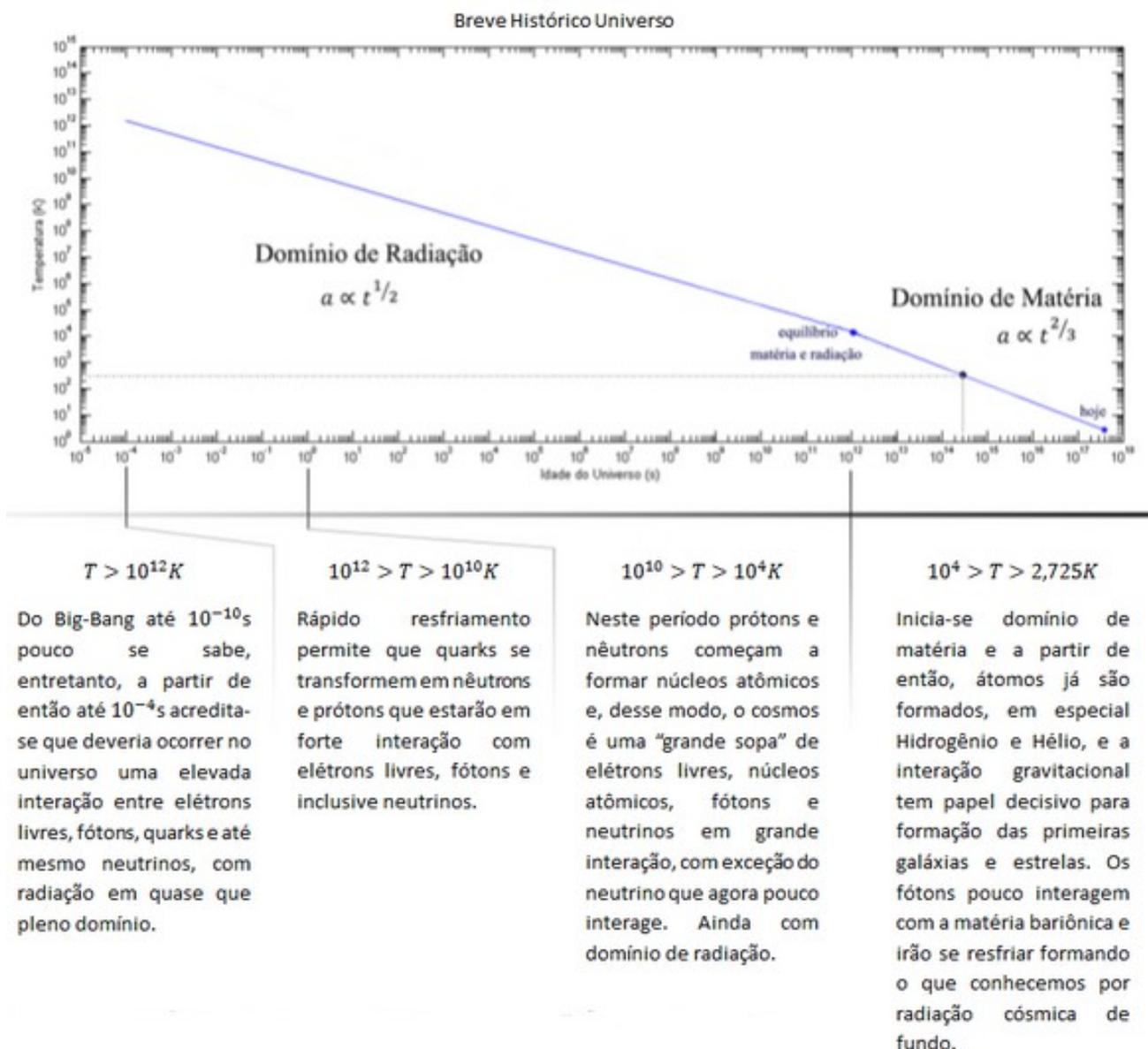


Gráfico 1: Histórico da temperatura em função do tempo de vida do universo em escala log-log. Nele, estão destacados os períodos de dominância de matéria e de radiação, bem como as proporcionalidades do tempo com o fator de escala. Além disso, estão explicitos a idade atual, o ponto de equilíbrio de matéria e radiação e o ponto no qual $T=300 K$, de grande interesse para nossos estudos.

A partir desta constatação, será possível analisarmos a origem das estruturas existentes no universo baseando-se nas pequenas variações na homogeneidade e isotropia no começo do universo que levaram a suas formações. Um peça chave para o entendimento de como pequenas perturbações tornaram-se grandes o bastante para a geração de estrelas e galáxias é a atração gravitacional. Supondo que em alguma época do universo, período da “Dissociação”, por exemplo, houvesse algumas ínfimas irregularidades na distribuição de massa, as regiões com excesso exerceriam um campo gravitacional maior que outras localidades, desse modo, atrairiam cada vez mais material da vizinhança, aumentando sua densidade e por consequência atraindo gravitacionalmente ainda mais matéria, levando a inhomogeneidade observada atualmente.

Contudo, é importante a ressalva de que mesmo com o discutido nos parágrafos acima, se analisado como um todo, em largas escalas (algo em torno de dez mega Parsecs) o universo pode ser assumido como homogêneo e isotrópico e todo o ferramental físico-matemático utilizado anteriormente adequa-se bem aos dados coletados, explicando adequadamente os fenômenos observados no universo.

Como visto acima, a atração gravitacional é capaz de amplificar ínfimas irregularidades iniciais para formação das estruturas existentes atualmente no universo. Todavia, para o entendimento do que originou tais pequenas descontinuidades, é preciso voltar suficientemente ao passado, algo entorno de $10^{-34} s$ após o Big-Bang, quando acredita-se que ocorreu um fenômeno denominado “Inflação”. A “Expansão Inflacionária” foi sugerida em 1981 por Alan Guth e propõe que neste período do universo o fator de escala estava acelerando, ou seja, $\dot{a}(t) > 0$. Portanto, para melhor compreender os desdobramentos desta afirmação será iniciada a análise a partir da equação da aceleração, a qual tem sua demonstração feita no Apêndice 3, levando a afirmação de que:

$$\frac{\dot{a}}{a} = \frac{-4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) e \dot{a}(t) > 0 \rightarrow p < \frac{-\rho c^2}{3}$$

Tal resultado indica que a expansão inflacionaria é um caso em que o universo possui constante cosmológica. Desse modo, consideraremos a equação de Friedmann com a inclusão da constante Λ , notando que os dois primeiros termos a direita podem ser considerados nulos:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k c^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \rightarrow H^2 = \frac{\Lambda}{3} \rightarrow \frac{\dot{a}}{a} = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}} \therefore a(t) = \exp\left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} t\right)$$

Desse modo, nota-se que neste período o universo se expandia exponencialmente e de acordo com a mecânica quântica, especificamente com o Princípio de Heisenberg, sabe-se que mesmo num espaço aparentemente vazio ocorre uma série de flutuações quânticas que normalmente não são notórias. Contudo, é de se pensar que tais flutuações no período da inflação sofriam influencia da expansão exponencial do universo e ao passo que eram alteradas pela expansão, novas flutuações surgiam e seriam em breve afetadas, fazendo com que ao final deste processo, existisse então uma série de pequenas irregularidades de diferentes proporções. Em seguida, a atração gravitacional deverá agir de modo amplificar tais descontinuidades levando, muito tempo depois, a formação de estrelas, planetas, galáxias e aglomerados de galáxias dando origem às estruturas presentes no universo atual.

Formação de elementos químicos nas estrelas [7]

As estrelas possuem estágios de vida, desde o nascimento até o fim de sua vida, nos quais a produção de energia é acompanhada por diferentes reações químicas, surgindo elementos químicos que ainda não existiam nos primórdios do universo. Dentre eles, estão o carbono e o nitrogênio, ambos necessários para o surgimento da vida como conhecemos. Nesse capítulo, serão vistos os processos pelos quais os elementos se formaram:

Estrelas de pouca massa $\sim 0,05 - 0,5 M_{\odot}$

Quando estrelas possuem pouca massa, inicialmente ocorrem reações de fusão nuclear em seu núcleo, onde hidrogênio é convertido em hélio. Para isso, o núcleo deve possuir uma temperatura de 10 milhões K, sendo que só é alcançada quando a massa da estrela for aproximadamente $1/12 M_{\odot}$.

Abaixo, será descrito o conjunto de reações que correspondem à fusão do hidrogênio, acompanhado do denominado ciclo pp I (ou próton-próton principal), e a reação global resultante. Simultaneamente, existem os ciclos ppII e ppIII, os quais estão esquematizados na figura abaixo (figura 1) com o ciclo pp I. Nesses, são formados berílio (Be) e lítio (Li).

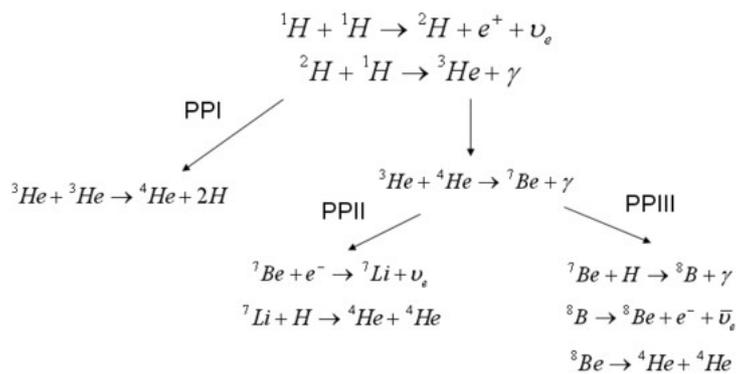


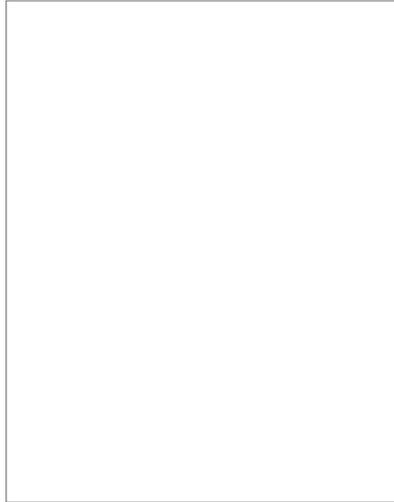
Figura 1^[8]: Esquema de reações que ocorrem no ciclo pp no núcleo de uma estrela

Para que o hélio seja fundido em elementos mais pesados, é necessário que o núcleo estelar esteja a 100 milhões K, e uma estrela de pouca massa não é capaz de produzir pressão suficiente para elevar a temperatura a esse nível. Portanto, a fim de surgir elementos químicos mais pesados, são requeridas estrelas mais massivas para sedear as reações, como veremos a seguir.

Estrelas de massa média $\sim 0,5 - 8 M_{\odot}$

Essa classificação se deve ao final em comum que estrelas nessa faixa de massa possuem: elas se contraem até se converterem em anãs brancas. Contudo, na faixa de abaixo de $2 M_{\odot}$, hidrogênio se torna hélio através do ciclo pp. Além disso, há outro mecanismo com a mesma finalidade, denominado carbono-nitrogênio-oxigênio (CNO), que providencia de 1~2% da energia total produzida na estrela. Em contrapartida, na faixa acima de $2 M_{\odot}$, esse processo se torna dominante.

Quando o processo CNO atinge o equilíbrio, as reações de cada estágio ocorrem na mesma proporção. Como a quarta reação do processo é a mais lenta, há uma compensação com um número maior de nitrogênio, pois o equilíbrio químico se desloca para o lado direito da reação. Sendo



Esquema de reações do ciclo CNO^[9]

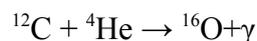
assim, o número de carbono, nitrogênio e oxigênio é conservado, mas o número de núcleos de nitrogênio passa a ser mais dominante. Esse é praticamente o processo que produziu todo o nitrogênio existente, e foi muito importante para o surgimento da vida.

O processo do triplo-alfa

Ambos os processos do ciclo pp e CNO se encerram quando o núcleo estelar é convertido em ${}^4\text{He}$, cessando a pressão no núcleo, que era causada pelas reações. Isso possibilita que ele se contraia pela gravidade, permitindo que a temperatura se eleve até 100 milhões K, suficiente para iniciar novas reações, conhecidas por “processo do triplo alfa”, pois envolve três núcleos de He, conhecidos como partícula alfa.

À temperatura citada, os núcleos de ${}^4\text{He}$ se fundem com ${}^8\text{Be}$, formando um núcleo de ${}^{12}\text{C}$, outro elemento indispensável para o surgimento da vida como conhecemos.

A partir daí, mais uma reação pode ser formada, responsável pela formação do oxigênio:



Estrelas supermassivas $\sim >8 M_{\odot}$

Em estrelas supermassivas, a temperatura tende a ultrapassar os limites impostos por estrelas em faixas de massa menores. Ou seja, a captura de partículas alfa dura mais tempo, possibilitando a formação de elementos químicos mais pesados, além de carbono e oxigênio, da seguinte maneira: ${}^{16}\text{O}$ se funde em ${}^{20}\text{Ne}$, que se funde em ${}^{24}\text{Mg}$ e, por fim, se funde em ${}^{28}\text{Si}$, formando um núcleo composto de silício. Os números de massa aumentam em um múltiplo de 4 porque a cada reação, uma partícula de ${}^4\text{He}$ é absorvida.

Para cada reação que se sucede, a temperatura para que ela ocorra deve aumentar, visto que a barreira de potencial aumenta, dificultando o tunelamento da partícula alfa recebida. Durante esses eventos, prótons podem reagir com os elementos já formados e produzir ${}^{19}\text{F}$ e ${}^{23}\text{Na}$, embora sejam reações menos comuns.

Quando a temperatura atinge 3×10^9 K, o silicato passa por uma série de reações, vindo a se transformar em ${}^{32}\text{S}$, ${}^{36}\text{Ar}$, e assim por diante, até se fundir em ${}^{56}\text{Fe}$. Ferro possui o núcleo mais estável da tabela periódica (como mostrado no gráfico 2), e qualquer reação que viria a seguir para formar

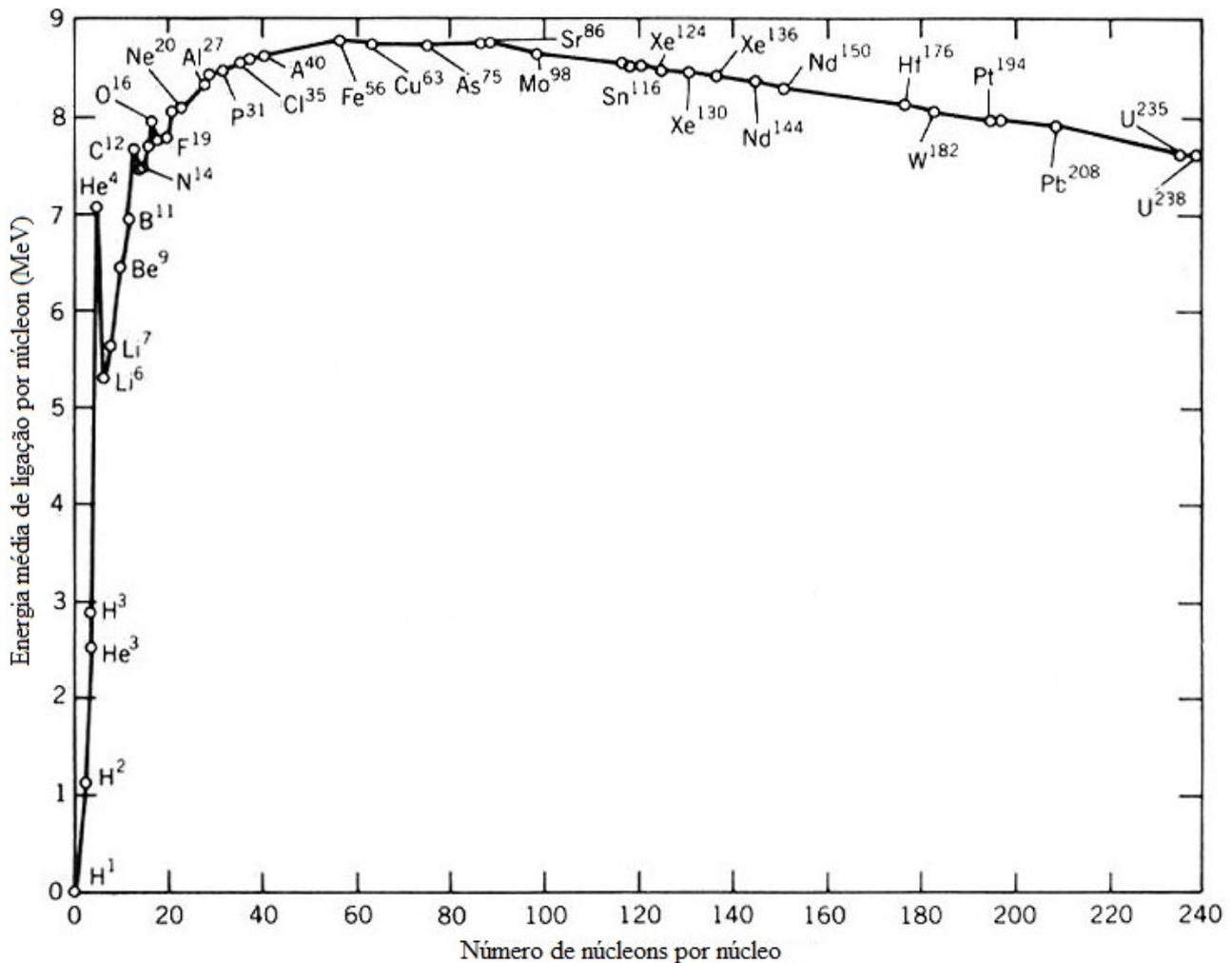


Gráfico 2^[10]: Energia média de ligação de um núcleo atômico em função do número de núcleons por núcleo. Note que o ferro possui o núcleo mais estável, pois possui a energia de ligação maior.

núcleos mais pesados seriam necessariamente endotérmicas, portanto a fusão nuclear deve parar nessa fase.

Com isso, conclui-se o entendimento do processo de formação de elementos químicos indispensáveis para a vida.

“Meu orientador concorda com o expressado neste relatório parcial e deu a seguinte opinião:

O aluno cumpriu com o esperado, mostrando comprometimento com o desenvolvimento do seu projeto, o que se reflete na boa qualidade de seu relatório”.

Referências

- [1] LOEB, Abraham; *The Habitable Epoch of the Early Universe*. preprint arXiv: 1312.0613.
- [2] LIDDLE, Andrew; *An Introduction to Modern Cosmology*. 2. ed. London: Wiley, 2009. 189p.
- [3] *Physics, Astrophysics and Cosmology with Gravitational Waves* - B.S. Sathyaprakash, Bernard F. Schutz. (2009)
- [4] <https://www.advancedligo.mit.edu/summary.html>
- [5] <https://www.elisascience.org/articles/elisa-mission/mission-concept>

- [6] *Gravity - An Introduction to Einstein's General Relativity* - James B. Hartle - Addison Wesley (2003)
- [7] *Introduction to Astronomy and Cosmology* – Ian Morrison (2008)
- [8] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c5/CadenaPP.png/600px-CadenaPP.png>
- [9] <http://www.astro.iag.usp.br/~maciel/teaching/artigos/elementos/rn3.jpg>
- [10] https://courses.engr.illinois.edu/npre201/coursematerial/nuclear_physics/lecture20figures/fig42.jpg