

CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO LIMPO PAULISTA
QUÍMICA BACHARELADO

JULIO CESAR MIRANDA DA SILVA

**A EXPLOSÃO DAS ESTRELAS E A FORMAÇÃO DOS ELEMENTOS
PESADOS DA TABELA PERIÓDICA**

CAMPO LIMPO PAULISTA

2022

JULIO CESAR MIRANDA DA SILVA

A EXPLOSÃO DAS ESTRELAS E A FORMAÇÃO DOS ELEMENTOS PESADOS DA TABELA PERIÓDICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário Campo Limpo Paulista para conclusão do curso de Química Bacharelado sob a orientação da Profa. Dra. Maria do Carmo Santos Guedes e coorientação do Prof. Dr. Cesar Henrique Siqueira Mello Junior.

CAMPO LIMPO PAULISTA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio nestes anos de curso, a todos os professores da graduação de Bacharelado em Química da Universidade de Campo Limpo Paulista e também aos meus colegas de curso, que foram primordiais para finalização do curso, pelo compartilhamento de vivências. Especialmente a minha professora de química do Ensino Médio, Gislaine Sanitar, uma das responsáveis pela minha escolha de curso e também a Sara A. Grosbelli, colega de tantos anos de curso e de vida.

Agradeço especialmente a Professora Dra. Maria do Carmo e Júlia Buci, ambas grandes inspirações de profissionais, que transparecem a vontade de dar aula e de fazer o curso de Química perpetuar por muito tempo na comunidade campo-limpense e da região.

À cada pessoa que me auxiliou na escrita deste trabalho, com enfoque na professora Dra. Maria do Carmo e no meu coorientador, prof. Dr. Cesar Henrique, fico grato pela atenção e compreensão.

“Somos todos poeira de estrelas”.

Carl Sagan
4

RESUMO

O estudo cosmológico advém de muito tempo atrás, desde quando os humanos passaram a assentar-se formando civilizações. A curiosidade humana foi o principal fator para o início desses estudos. A cosmologia abrange questionar e estudar diversos fenômenos, entre eles a constituição primordial do universo - saber do que os elementos são formados sempre foi uma pauta entre os filósofos e cientistas. Contudo, foram necessários muitos trabalhos para entender como tudo foi formado, e ainda existem diversas dúvidas em como todo esse processo ocorreu e como ocorre até os dias de hoje. Esse trabalho tem por intuito compreender a formação fundamental dos elementos no universo, fazendo revisões bibliográficas em artigos e livros, que vão desde o entendimento dos processos de nucleossíntese primordial - que formou os primeiros elementos químicos do universo, até os processos de nucleossíntese mais complexos que formaram grande parte dos elementos mais pesados existentes.

Palavras-chaves: nucleossíntese, Big Bang, elementos químicos, fusão nuclear, partículas, universo.

ABSTRACT

The cosmological study comes from a long time ago, since when humans began to settle down forming civilizations. Human curiosity was the main factor for the initiation of these studies. Cosmology encompasses questioning and studying various phenomena, including the primordial constitution of the universe - knowing what the elements are made of has always been an agenda among philosophers and scientists. However, it took a lot of work to understand how everything was formed, and there are still many doubts about how this whole process occurred and how it occurs until today. This work aims to understand the fundamental formation of elements in the universe, making bibliographic reviews in articles and books, ranging from the understanding of primordial nucleosynthesis processes - which formed the first chemical elements of the universe, to the more complex nucleosynthesis processes that formed much of the heaviest elements in existence.

Keywords: nucleosynthesis, *Big Bang*, chemical elements, nuclear fusion, particles, universe.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
JUSTIFICATIVA	17
OBJETIVOS	18
GERAL.....	18
ESPECÍFICOS	18
METODOLOGIA.....	19
CAPÍTULO 1 – CONSTITUIÇÃO FUNDAMENTAL DO UNIVERSO	20
1.1. Matéria Escura.....	20
1.2. Energia Escura.....	23
1.3. Matéria Bariônica e o Processo de Nucleossíntese.....	25
CAPÍTULO 2 – BIG BANG E A FORMAÇÃO DAS ESTRELAS.....	26
2.1. Big Bang.....	26
2.1.1. Era 1: Big Bang e Era de Planck.....	27
2.1.2. Era 2: Era GUT	28
2.1.3. Era 3: Era da Interação Eletrofraca.....	29
2.1.4. Era 4: Era das Partículas.....	30
2.1.5. Era 5: Era da Nucleossíntese	30
2.1.6. Era 6: Era da Recombinação	32
2.1.7. Era 7: Era das Estruturas	33
2.1.8. Era 8: Era Presente	35
2.2. Estrelas.....	35
2.2.1. Formação Estelar	35
2.3. A Evolução das Estrelas	36
2.3.1. Diagrama Hertzsprung-Russell (HR).....	37
CAPÍTULO 3 – FORMAÇÃO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS PESADOS DA TABELA PERIÓDICA	39
3.1. Nucleossíntese Primordial	39
3.2. A Nucleossíntese Estelar	42
3.2.1. Reação de Cadeia Próton-próton.....	42
3.2.2. Ciclo CNO	44
3.2.4. Queima do Hélio.....	46
3.2.5. Fases Finais da Nucleossíntese Estelar	48
3.3. Formação dos Elementos Químicos Pesados da Tabela Periódica.....	51
3.3.1. Nucleossíntese Explosiva e processos de captura de nêutrons	51

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de rotação da Via Láctea, mostrando que o comportamento observado possui velocidades superiores aos valores previstos para a matéria luminosa (IF-UFRGS)....	21
Figura 2 - Efeito produzido por uma lente gravitacional (NASA; ESA)	22
Figura 3 - Constituição e destruição de partículas: proporcionalidade massa e energia de Einstein (BRITO; MASSONI, 2019)	29
Figura 4 - Representação da produção dos elementos químicos primordiais com $T = {}^3\text{H}$ (BRITO; MASSONI, 2019)	31
Figura 5 - Pilares de formação de estrelas capturado pelo telescópio James Webb (NASA, 2022).....	34
Figura 6 - Grupo de galáxias conhecido como o Quinteto de Stephan, capturo pelo telescópio James Webb (NASA, 2022)	34
Figura 7 - Diagrama HR das estrelas: luminosidade, temperatura e tipo espectral (Saraiva; Filho, 2022)	38
Figura 8 – Reações Nucleares (Britto; Massoni, 2019).....	39
Figura 9 - Formação de Hélio durante a Nucleossíntese Primordial (USP).....	40
Figura 10 - Desacoplamento da Matéria e da Radiação (Bertolo, 2022)	41
Figura 11 - Representação esquemática da queima hidrostática de hidrogênio em hélio (BRITTO; MASSONI, 2019).....	42
Figura 12 - Queima Hidrostática de Hidrogênio em Hélio através do Ciclo CNO (BRITO; MASSONI, 2019).....	45
Figura 13 - Cadeia de Reações do ciclo CNO I, II, III e IV (COCOCUBED)	46
Figura 14 - Processo Triplo-alfa (UFRGS)	47
Figura 15 - Estrutura esquemática das diferentes camadas de uma estrela massiva completamente evoluída, identificando os seus principais elementos químicos (IPAC)	49
Figura 16 - Estrutura Estelar no Ramo Assintótico das Gigantes (MACIEL, 2020)	50
Figura 17 - Representação de um sistema duplo cuja explosão recebe o nome de supernova tipo Ia (NASA, 2018)	51
Figura 19 - Exemplo do processo-s (MACIEL, 2020).....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reações Nucleares da Era da Nucleossíntese.....	31
Tabela 2 - Reações Nucleares da Cadeia PP	43
Tabela 3 - Principais Reações Nucleares do Ciclo CNO.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GUT	<i>Grand Unified Theories</i>
GHz	Gigahertz
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PPI	Reação próton-próton I
PPII	Reação próton-próton II
PPIII	Reação próton-próton III
p-p	Reação próton-próton
CNO	Ciclo Carbono-Nitrogênio-Oxigênio
CNO I	Ciclo Carbono-Nitrogênio-Oxigênio I
CNO II	Ciclo Carbono-Nitrogênio-Oxigênio II
CNO III	Ciclo Carbono-Nitrogênio-Oxigênio III
CNO IV	Ciclo Carbono-Nitrogênio-Oxigênio IV
Processo-s	Processo <i>slow</i> (do inglês, lento)
Processo-r	Processo <i>rapid</i> (do inglês, rápido)

LISTA DE SÍMBOLOS

t_0	Tempo inicial
H / ^1H	Hidrogênio
D / ^2H / $^2\text{H}_2$	Deutério
^3He	Isótopo Hélio-3
^4He	Isótopo Hélio-4
^7Li	Isótopo Lítio-7
M_{Sol}	Massa solar
M	Massa estelar
^3H	Trítio
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
Au	Ouro
Pu	Plutônio
U	Urânio
t	Tempo
s	Segundo
T	Temperatura
n	Nêutron
p	Próton
α	Alfa
e^-	Elétron
β^-	Partícula beta (elétron)
e^+	Pósitron
β^+	Partícula beta (pósitron)
γ	Fóton
K	Kelvin
E	Energia
m	Massa
c^2	Velocidade da luz ao quadrado
^7Be	Isótopo Berílio-7
mm	Milímetro
Kg	Quilograma

°C	Grau Celsius
⁸ Be	Isótopo Berílio-8
⁸ B	Isótopo Boro-8
ν_e	Neutrino do elétron
¹³ N	Isótopo Nitrogênio-13
¹⁶ O	Isótopo Oxigênio-16
¹⁵ N	Isótopo Nitrogênio-15
¹² C	Isótopo Carbono-12
¹⁴ N	Isótopo Nitrogênio-14
¹⁷ O	Isótopo Oxigênio-17
¹⁷ F	Isótopo Flúor-17
¹⁸ O	Isótopo Oxigênio-18
¹⁸ F	Isótopo Flúor-18
¹⁵ O	Isótopo Oxigênio-15
¹⁹ F	Isótopo Flúor-19
x	Multiplicação / sautor
+	Adição
→	Seta
²⁰ Ne	Isótopo Nêonio-20
²³ Na	Isótopo Sódio-23
²⁴ Mg	Isótopo Magnésio-24
²⁸ Si	Isótopo Silício-28
Ca	Cálcio
Ti	Titânio
Fe	Ferro
Mn	Manganês
Co	Cobalto
Zn	Zinco
Cu	Cobre
Z	Número atômico
A	Número de massa atômica
⁵⁶ Fe	Isótopo Ferro-56
²⁵ Mg	Isótopo Magnésio-25

²⁶ Mg	Isótopo Magnésio-26
²⁹ Si	Isótopo Silício-29
²¹ Ne	Isótopo Nêonio-21
²² Ne	Isótopo Nêonio-22
²⁰⁹ Bi	Isótopo Bismuto-209
¹³ C	Isótopo Carbono-13
⁵⁷ Fe	Isótopo Ferro-57
⁵⁸ Fe	Isótopo Ferro-58
⁵⁹ Fe	Isótopo Ferro-59
⁶⁰ Ni	Isótopo Níquel-60
⁴⁸ Ca	Isótopo Cálcio-48
⁵⁰ Ti	Isótopo Titânio-50
⁵⁴ Fe	Isótopo Ferro-54
⁶² Ni	Isótopo Níquel-58
³⁶ Ar	Isótopo Argônio-36
³² S	Isótopo Enxofre-32
³¹ S	Isótopo Enxofre-31
⁴⁰ Ca	Isótopo Cálcio-40
³¹ P	Isótopo Fósforo-31

INTRODUÇÃO

A origem do universo e de tudo que o compõe sempre foi uma das principais curiosidades da humanidade, principalmente quando se fala da origem fundamental de tudo que existe, desde os seres vivos que constituem o planeta Terra até aos grandes objetos constituintes do universo, como as estrelas e as galáxias (STEINER, 2006).

Praticamente toda civilização antiga conhecida possui alguma história de como o mundo começou. Geralmente essas histórias advinham de fundamentos religiosos, mitológicos ou filosóficos. A teoria mais aceita hoje em dia é bem atual e é a mais aceita dentre o meio científico, a famosa teoria do *Big Bang* (STEINER, 2006).

Diversos cientistas contribuíram para o conhecimento atual da formação primordial do universo, desde a Lei de Hubble, que correlacionou à distância e velocidade das galáxias. Segundo a Lei: quando maior à distância, com mais velocidade as galáxias se afastam de nós (STEINER, 2006).

Albert Einstein também foi um dos algozes do início do estudo da formação do universo, com sua Teoria da Relatividade Geral, que consiste em um conjunto de hipóteses que generaliza a relatividade especial e a lei da gravitação universal de Isaac Newton, fornecendo uma descrição da gravidade como uma propriedade geométrica do espaço-tempo (AGUIAR, 2018).

O trabalho visa uma abordagem no histórico da formação dos elementos químicos da tabela periódica, exemplificando no Capítulo 1 a constituição fundamental do universo, o qual são abordados os conceitos de matéria escura, energia escura e matéria bariônica, que até estudos recentes, são os principais constituintes do universo.

No capítulo 2, é evidenciado o processo da formação inicial do universo, através da grande explosão, denominada de *Big Bang*. Apresentam-se todas as fases do *Big Bang*, que vão desde os segundos iniciais da sua existência até os dias atuais, utilizando-se de dados como temperatura inicial e tempo para determinar suas fases principais, como o aparecimento dos primeiros elementos químicos através do processo da nucleossíntese primordial, que em tese, pode ser definida como a junção de partículas primordiais (prótons e nêutrons) para a formação de um átomo.

Ao longo do Capítulo 3, são apresentados os processos mais complexos para formação dos elementos químicos pesados da tabela periódica. Processos como a nucleossíntese estelar (processo de fusão nuclear no interior das estrelas) e também o processo de captura de nêutrons através da nucleossíntese explosiva, que ocorre somente em explosões de estrelas muito massivas.

JUSTIFICATIVA

A Astroquímica, estudo de como os elementos são formados, ainda é pouco difundida no ensino acadêmico, pois geralmente apenas uma explicação sucinta é apresentada: que eles oriundos de explosão estelares. Além disso, conhecer as propriedades dos átomos e suas interações é primordial para o entendimento de muitos processos astroquímicos, astrofísicos e até mesmo astrobiológicos que envolve uma forte vertente da astronomia.

Durante os anos de estudos acadêmicos deste pesquisador, muitos temas o chamaram atenção, com enfoque principal na química quântica, que aborda inúmeros assuntos que correlacionam com a área escolhida para pesquisa.

A presente pesquisa, com base em revisão bibliográfica, avaliou trabalhos que abordam a formação de praticamente todos os elementos químicos conhecidos, desde o surgimento do hidrogênio na nucleossíntese primordial até a formação do ferro e dos demais elementos pesados durante os mecanismos de explosão de uma estrela supermassiva em supernova.

O objetivo do trabalho é, portanto, despertar no pesquisador o interesse em descobrir e se aprofundar no campo da pesquisa descrito acima, nos processos de fusão nuclear que dão origem a tudo que se conhece atualmente. A astrofísica aliada à química é a junção desses dois temas, que são de extrema relevância na contemporaneidade.

OBJETIVOS

GERAL

O objetivo deste trabalho consiste no estudo dos processos astroquímicos e astrofísicos presentes na formação dos elementos da tabela periódica, com maior atenção aos processos de fusão provenientes das explosões de estrelas supermassivas e a produção de elementos pesados.

ESPECÍFICOS

- Exemplificar as características dos diferentes tipos de estrelas e suas resultantes;
- Compreender as supernovas de tipo II que formam os elementos mais pesados que o Ferro;
- Aprimorar os modelos teóricos para permitir os estudos na área de astroquímica, principalmente no âmbito da formação elementar do universo.

METODOLOGIA

O delineamento desta pesquisa caracterizou-se como uma revisão sistemática, baseando-se em pesquisas por artigos científicos atuais em periódicos científicos indexados ao Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), no Google Acadêmico, na Scientific Electronic Library Online (SciELO), na Pubmed e na Science Direct. Os critérios de inclusão foram trabalhos publicados em português ou inglês, artigos na íntegra indexados nos referidos bancos de dados entre 2004 e 2022, utilizando os descritores: “Big bang e estrelas”, “nucleossíntese”, “formação dos elementos químicos”. Foi utilizado como critério de exclusão artigos que não contemplassem a temática.

CAPÍTULO 1 – CONSTITUIÇÃO FUNDAMENTAL DO UNIVERSO

1.1. Matéria Escura

No meio científico acredita-se que possa existir muito mais matéria nas galáxias do que se pode ver atualmente a partir de toda a radiação produzida pelas estrelas e também pelos gases que existem nestas galáxias. Denominada como matéria escura, ela estaria distribuída em “anéis” ao redor e dentro das galáxias.

Conforme estudos, a matéria escura é eletricamente neutra, não relativística e estável nas escalas cosmológicas. Além do mais, ela é não bariônica, isto é, não é composta por prótons e nêutrons e, por consequência, é diferente da matéria dos elementos que formam a tabela periódica. A matéria escura está presente desde as pequenas galáxias existentes até os grandes aglomerados de galáxias. Ela age como um buraco de potencial gravitacional para a formação dessas estruturas cósmicas do universo. Algumas das primeiras evidências da existência da matéria escura envolvem informações sobre as curvas de rotação de estrelas nas bordas de galáxias espirais, sobre a velocidade de rotação de galáxias nos aglomerados e também sobre lentes gravitacionais.

Essas primeiras evidências da existência da matéria escura advêm do começo do século XX. A maior parte das galáxias fica agrupada em famílias, que são denominadas de aglomerados. Um estudo feito pelo astrônomo suíço Fritz Zwicky (1898-1974), mediu a massa de um desses aglomerados, o aglomerado “Clustes” de Coma. Este conta com mais de mil galáxias e um diâmetro de cerca de 20 milhões de anos luz, tendo em seu centro duas galáxias elípticas gigantes, NGC 4874 e NGC 4889.

No estudo realizado pelo astrônomo, ele obteve a informação, através de cálculos, que a massa do aglomerado era 400 vezes maior do que a soma das massas visíveis das suas galáxias; conforme o próprio Zwicky, a densidade do aglomerado de Coma, obtida a partir dos seus efeitos gravitacionais, “teria que ser 400 vezes maior do que o valor derivado das observações da matéria luminosa” (ZWICKY, 1933). A grande variação que existem nas velocidades aparentes das galáxias presentes dentro do aglomerado de Coma, que ultrapassam 2.000 km/s, mostra que há muito mais massa do que a associada às suas estrelas. Tem-se uma matéria “faltante”, a matéria escura, que mantém o aglomerado gravitacionalmente consistente.

Posteriormente as observações realizadas por Zwicky, o astrônomo Sinclair Smith (1899-1938), estudando o aglomerado de Virgem (Virgo) confirmaram os resultados obtidos por Zwicky.

O problema encontrado por Zwicky esperou anos até ser discutido novamente. Somente em 1970 a questão veio à tona novamente através de estudos realizados pela astrônoma Vera Cooper Rubin (1928-2016) e demais membros da sua equipe. O trabalho realizado por ela sobre a rotação de galáxias espirais mostrava que a velocidade de rotação das estrelas na borda das galáxias era duas vezes maior do que a previsão teórica pela matéria visível. A velocidade de rotação das galáxias espirais tinha pouca mudança com a distância ao centro da galáxia. Contudo, essa velocidade deveria cair notavelmente com a distância ao centro, devido ao efeito gravitacional da massa das estrelas visíveis (TEIXEIRA; SOUZA, 2022).

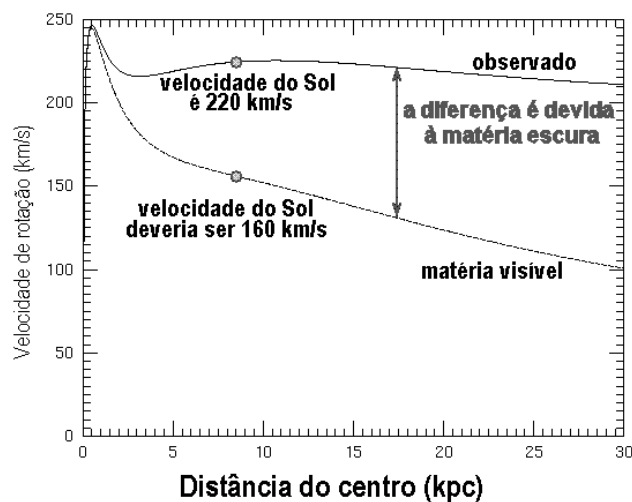


Figura 1 - Curva de rotação da Via Láctea, mostrando que o comportamento observado possui velocidades superiores aos valores previstos para a matéria luminosa (IF-UFRG, 2022).

Essa discrepância na velocidade de rotação foi analisada nas estrelas da borda da galáxia de Andrômeda, galáxia vizinha à Via Láctea, verificando ser real e indicando a existência de matéria escura. A velocidade de rotação na periferia da galáxia era mais próxima da região central do que o esperado pelos estudos da massa visível desta galáxia. A determinação de Vera Rubin ao estudar a matéria escura ao longo de 30 anos estabeleceu a importante participação dessa componente na estrutura do Universo.

Uma galáxia se mantém coesa pela gravidade. Contudo, a força gravitacional é praticamente dominada pela matéria escura, que é distribuída de maneira mais estendida do que a parte visível das galáxias, possuindo forma esferoidal. A matéria comum, chamada de matéria bariônica, é composta majoritariamente de hidrogênio e hélio, os principais constituintes de todas as estrelas. Ainda que a matéria escura seja 84% da massa total do universo, a radiação

eletromagnética só é produzida pelos bárions por conta das cargas elétricas, ou seja, pela matéria bariônica tradicional, da qual as estrelas e nós somos constituídos (TEIXEIRA; SOUZA, 2022).

Aperfeiçoar a técnica das lentes gravitacionais é uma das maneiras de obter um conhecimento mais aprofundado sobre onde existem as grandes concentrações de matéria escura. De acordo com a Relatividade Geral, a matéria é capaz de provocar uma distorção do tecido do espaço-tempo, de modo que a luz de um objeto que está muito distante da Terra, ao atravessar uma região com grande concentração de matéria escura, acaba percorrendo essa trajetória curva e produzindo uma estrutura conhecida como anel de Einstein. Na Figura 2 é possível notar esse efeito, onde a imagem central se desdobra em quatro visualizações quando observado, não sendo possível notar alguma barreira visível na trajetória da luz que produziria esse efeito, a lente gravitacional, sendo então explicado pela presença de matéria escura. Em vista disso, as lentes gravitacionais podem auxiliar bastante nos estudos sobre a matéria escura (TEIXEIRA; SOUZA, 2022).

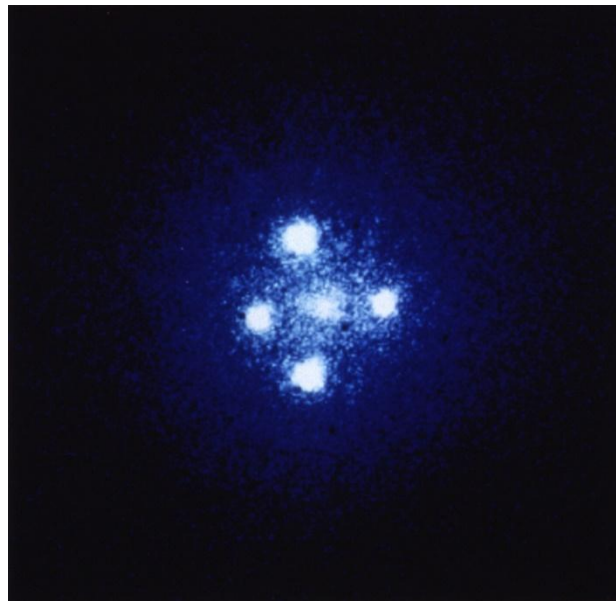


Figura 2 - Efeito produzido por uma lente gravitacional (NASA; ESA)

Nas galáxias espirais, a matéria bariônica presente distribui-se na forma parecida com a de um disco, já a distribuição de matéria escura aproxima-se do formato de uma esfera. Isso ocorre porque provavelmente a matéria escura, que se acredita ser não-bariônica, interage exclusivamente gravitacionalmente, formando halos esféricos. Outrossim, a matéria bariônica pode interagir também com o campo eletromagnético, assim, emitindo radiação e perdendo

energia, colapsando em corpos altamente densos como as estrelas, porém conserva o momento angular, o que faz formar os discos. A matéria bariônica é capaz de atingir altas densidades devido a retirada pela radiação da energia de agitação térmica, o que é impossível para a matéria escura. Isso pode explicar o motivo do centro da galáxia possuir mais matéria bariônica do que matéria escura, enquanto na sua região periférica ocorre o contrário (TEIXEIRA; SOUZA, 2022).

1.2. Energia Escura

O início da cosmologia moderna se deu em 1917 com Albert Einstein (1879-1955), quando este postulou um modelo de universo estático consistente com a Teoria da Relatividade Geral, proposta por ele em 1915. Porém, anos mais tarde, Einstein se retratou devido a novas evidências sobre a expansão do universo, proposta por Edwin Hubble (1889-1953), que estudou o efeito Doppler na análise de redshifts (desvios para o vermelho) na luz de galáxias distantes. Para isso, Einstein inseriu em suas equações a famosa e controversa constante cosmológica (TEIXEIRA; SOUZA, 2022).

George Gamow (1904-1968), um dos precursores da teoria do *Big Bang*, em um trabalho realizado em 1948, intitulado “A Origem dos Elementos Químicos” (“*The Origin of Chemical Elements*”), propôs que a produção de elementos químicos começou em um tempo inicial t_0 (ALPHER; BETHE; GAMOW, 1948). Desde então, a Teoria do *Big Bang* foi se consolidando no meio científico da época, acumulando várias evidências, como a descoberta da radiação cósmica de fundo de micro-ondas em 1965, por Arno Penzias (1933-) e Robert Woodrow Wilson (1936-). De fato, o modelo proposto por Alpher, Bethe e Gamow ganhou mais notoriedade, visto que foi capaz de prever as abundâncias de elementos leves no universo (hidrogênio e hélio), como também a razão entre a matéria bariônica e a radiação cósmica de fundo de micro-ondas.

Todavia, em 1998, houve uma descoberta de certa forma inesperada. Até tal data, acreditava-se que o universo estava desacelerando por conta da força gravitacional da matéria presente em todos os corpos celestes, pois é uma força atrativa e teria a capacidade de frear a expansão do universo; contudo, após medições cosmológicas de supernovas do tipo IA foram capazes de mostrar que, paradoxalmente, a expansão do universo está ocorrendo aceleradamente. Essa descoberta gerou uma grande confusão na comunidade científica, visto

que para o universo se expandir desta maneira é necessário a existência de uma “energia escura”, com origem ainda desconhecida, que seria “repulsiva”, diferente da interação gravitacional que é atrativa. Hoje, acredita-se que o universo é formado por aproximadamente 4,6% de matéria bariônica. 23,3% de matéria escura e 72,1% de energia escura. Energia escura trata-se do nome dado para o responsável pela expansão acelerada do universo. Parando para analisar, a energia escura, assim como a matéria escura, é o nome dado para parte da ignorância humana. Os estudos apontam que a expansão do universo não foi constante ao longo do tempo, começando a acelerar mais recentemente (cerca de 5 bilhões de anos atrás) (TEIXEIRA; SOUZA, 2022).

O estudo da energia escura se dá principalmente na investigação do seu efeito na expansão do universo, em específico na relação entre a distância da fonte luminosa e o desvio para o vermelho (*redshift*) de “velas padrão”, como, por exemplo, as supernovas do tipo IA (TEIXEIRA; SOUZA, 2022).

Foi ao final do século passado, que dados obtidos por duas equipes de cientistas trouxeram a necessidade de mudança no modelo cosmológico padrão, que propunha que o universo estava expandido de forma desacelerada. Os resultados de observações espectrais e fotométricas de supernovas do tipo IA, que foram analisados pela equipe do astrofísico Adam Guy Riess (1969-), mostraram um universo em expansão acelerada e com constante cosmológica positiva. Paralelo a isso, Saul Perlmutter (1959-), através da análise de 42 supernovas do tipo IA, indicou também que a constante cosmológica deveria ter um valor não nulo positivo com confiança de 99%, o que denota em um universo com expansão acelerada.

As estrelas anãs brancas possuem um limite máximo de massa antes de explodirem, o chamado limite de Schenberg-Chandrasekhar, que vale cerca de 1,4 massas solares, variando um pouco a depender da metalicidade estelar. Extrapolando esse limite, por conta de transferência de massa de uma estrela companheira em um sistema binário, ao explodirem, acabam convertendo a mesma quantidade de massa em energia (são as chamadas supernovas do tipo IA) e são o padrão universal para medir distâncias.

Pode-se definir a energia escura como antigravidade que está relacionada à aceleração da expansão do universo e parece ser o maior componente do universo físico, entretanto ainda não existe uma explicação teórica plausível sobre a sua natureza (TEIXEIRA; SOUZA, 2022).

1.3. Matéria Bariônica e o Processo de Nucleossíntese

Para entender do que é formada a matéria bariônica, é necessário entender um pouco mais sobre o átomo. Toda a matéria presente na Terra e nas estrelas é formada por átomos.

Os átomos são formados por prótons, nêutrons e elétrons. Com o nêutron e o próton tendo basicamente a mesma massa. Todavia, possuem uma massa bem mais expressiva que a do elétron, cerca de 1.800 vezes maior. Deste modo, a maior parte da massa do átomo concentra-se em no seu núcleo, formado por prótons e nêutrons (TEIXEIRA; SOUZA, 2022).

O elétron e o próton são partículas com certa estabilidade. Diferentemente do nêutron, que quando isolado dura 10 minutos. Decorrido esse tempo, este se transforma em um próton, um elétron e um antineutrino do elétron, a antipartícula do neutrino, sendo o neutrino uma partícula com massa bem inferior à do elétron. O nêutron, quando está no núcleo dos átomos, geralmente é estável, mas em isótopos com excesso de nêutrons podem decair via radiação beta (TEIXEIRA; SOUZA, 2022).

O próton e o nêutron são classificados como bárions. Bárion é o termo utilizado para designar um tipo de partícula constituída por três partículas indivisíveis, chamadas de quarks. O próton é formado por dois quarks up e um quark down. Enquanto o nêutron é constituído por dois quarks down e um quark up.

Os quarks se juntam para formar partículas maiores, como os bárions e os mésons (junção de um quark e um antiquark), chamadas coletivamente de hádrons. Porém, existe outro tipo de partícula que não formam estados ligados, os léptons. O elétron e o neutrino do elétron, assim como suas antipartículas, são exemplos de léptons.

Em suma, a matéria bariônica é aquela que possui bárions em sua composição. Os átomos são formados por dois tipos de bárions, os prótons e os nêutrons. Ou seja, a matéria tradicional formada por átomos é a matéria bariônica.

A formação inicial dessa matéria bariônica se deu inicialmente no início do processo de formação do universo, através do processo que virá a ser mencionado posteriormente neste trabalho, o *Big Bang*. Os núcleos dos elementos mais leves, como o hidrogênio (^1H), o deutério (^2H), o hélio (^3He e ^4He) e o lítio (^7Li) foram criados nos primeiros minutos de vida do universo, a partir da nucleossíntese primordial.

A síntese desses núcleos leves foi capaz de fazer algumas reações nucleares ocorrerem no meio gasoso interestelar, e alguns outros elementos puderam ser formados em poucas concentrações, antes mesmo da formação das galáxias. Todavia, a maior parte dos elementos mais pesados foram criados a partir de processos estelares das explosões de supernovas após a formação das galáxias. Após as estrelas queimarem o hidrogênio no seu interior tornam-se estrelas altamente ricas em hélio nas partes mais centrais. As estrelas capazes de queimarem hélio e que possuam $M_{\text{Sol}} < M < 8.M_{\text{Sol}}$ são as principais fontes dos elementos Carbono (C), Nitrogênio (N) e Oxigênio (O), e alguns outros elementos um pouco mais pesados. Já estrelas mais massivas ($M > 8.M_{\text{Sol}}$) são capazes de produzir núcleos desde o oxigênio até o zinco, com algumas delas possivelmente sendo até capazes de produzir uma certa quantidade de outros elementos mais pesados que o ferro, como o Ouro (Au), Plutônio (Pu) e Urânio (U). Existem inúmeros processos dentro de uma estrela que são responsáveis pela formação de elementos pesados, contudo os mecanismos mais importantes são as explosões das estrelas em nova, supernova ou hipernova, que dependerá da massa da estrela (RIBEIRO, 2017).

CAPÍTULO 2 – BIG BANG E A FORMAÇÃO DAS ESTRELAS

2.1. Big Bang

A teoria do *Big Bang* é uma das mais difundidas no meio científico, sendo também a mais aceita pela ciência como explicação para o surgimento das estruturas. É proposto que no seu ponto inicial o universo possuía massa zero, existindo apenas na forma de energia e temperatura consideradas “infinitas”, onde tudo era confinado em um espaço com pouco volume. Em algum momento desconhecido, por ventura, toda essa energia foi liberada culminando em uma “grande explosão” – o *Big Bang*.

Nos anos de 1920, Edwin Hubble, um astrônomo americano, que dá nome ao famoso telescópio desenvolvido pela NASA, estabeleceu uma relação entre a distância de uma galáxia e a velocidade de aproximação e afastamento de nós. A velocidade de uma galáxia se mede com certa facilidade, enquanto a distância precisa de uma gama de trabalhos, por conta disso, é uma medida difícil de ser obtida e de certa forma imprecisa, que só foi possível graças aos trabalhos da astrônoma Henrietta Leavitt (1868-1921) com as estrelas conhecidas como cefeidas. Depois de muito estudo, Hubble correlacionou a distância e velocidade de algumas

galáxias a qual já estava estudando. Ele propôs que quanto maior a distância mais rápido uma galáxia se afasta de nós. É a conhecida Lei de Hubble. O astrônomo mostrou em seus trabalhos que realmente o universo estava expandido, através do estudo da luz das estrelas de galáxias distantes, que tendiam para o vermelho, prova que estavam se afastando da Terra e, de certa forma, uma das outras (BRITO; MASSONI, 2019).

O que pode ajudar a explicar a complexidade dessa teoria é a realização de uma analogia bidimensional do universo. Costuma-se dizer que estamos em um universo tridimensional: ao andar para a frente, para os lados e pular para cima. Outrossim, ainda existe a dimensão do tempo. As quatro dimensões formam o universo a qual conhecemos. Imaginando outro universo, levando em consideração o ponto de vista matemático, pode-se criar, exemplificando, universos bidimensionais. Tendo como base a superfície de uma bexiga como exemplo de um universo bidimensional e na superfície existam formigas, algumas delas sendo astrônomas, cujo trabalho seja observar demais galáxias, medindo suas velocidades e distâncias. Se essa bexiga for assoprada até expandir-se, a formiga astrônomo irá observar que as galáxias próximas se afastam lentamente enquanto as galáxias distantes se afastam rapidamente do observador. Chega-se à conclusão então que a formiga descobriu a Lei de Hubble. Caso esse fenômeno fosse ao contrário, em vez da bexiga expandir, ela estivesse esvaziando, a formiga verificaria que as galáxias estão se aproximando uma das outras; efeito contrário a Lei de Hubble. À vista disso, essa lei evidencia a expansão do universo. Ou seja, no futuro ele será maior e no passado era menor do que é hoje (BRITO; MASSONI, 2019).

Os cálculos originais de Hubble mostraram uma idade de cerca de 15 bilhões de anos para o Universo, mas resultados mais recentes levam para idades entre 12,8 e 13,3 bilhões de anos e que está se expandindo até os dias de hoje.

Para uma melhor compreensão da teoria, as fases do *Big Bang* são divididas em épocas ou eras, que são descritas com maior atenção a seguir.

2.1.1. Era 1: Big Bang e Era de Planck

O Universo surgiu no tempo $t = 0$ s. Para a física o questionamento do que havia antes do instante inicial de $t = 0$ não faz sentido, visto que antes disso, espaço, tempo, massa e energia, principais constituintes do cosmos não existiam e, por consequência, não existe realidade física

antes do ponto inicial. A matéria manifesta-se por meio de eventos (movimentação, emissão de luz, expansão, entre outros); isso só ocorre quando entra em jogo o tempo; o tempo se faz presente no universo somente a partir do primeiro evento. Para a física, o evento imaginário foi o *Big Bang*, pois a partir dele originaram-se a matéria e o tempo.

Do instante $t = 0$ s até $t = 10^{-43}$ s a física ainda não tem uma explicação plausível do que aconteceu na história térmica do universo. Para tentar explicar o que aconteceu nesse intervalo de tempo, a física quântica e a relatividade geral precisariam ser reunidas. E somente quando isso acontecer, podemos ter uma explicação mais assertiva com relação as primeiras frações de vida do universo. Tem-se uma suposição que nas primeiras frações de segundos do universo, as quatro forças fundamentais da natureza - força nuclear forte, força nuclear fraca (descritas pela mecânica quântica), força eletromagnética e a força gravitacional (descrita pela relatividade geral) - estavam emaranhadas e não existia partículas elementares, apenas campos. Nesse instante, as temperaturas eram superiores a $T = 10^{32}$ K. A temperatura tem um papel importante na história de formação de partículas e dos elementos fundamentais, visto que, quanto mais o universo se expande mais sua temperatura diminui, esta que é o alimento das reações nucleares que darão origem aos elementos químicos e às partículas (BRITO; MASSONI, 2019).

2.1.2. Era 2: Era GUT

A estimativa teórica é que tenha acontecido entre 10^{-43} a 10^{-38} s e a 10^{32} a 10^{29} K. Nessa era o universo que antes tinha quatro forças unidas em uma só, agora possui duas forças fundamentais; a gravidade e as outras três forças (fraca, forte e eletromagnética) juntas, formando uma única força, a GUT (do inglês, *Grand Unified Theories*). Essa fase ficou conhecida como a Era das Teorias da Grande Unificação.

Em teoria, conjectura-se que, quando o tempo do Universo atingiu $t = 10^{-38}$ s e a temperatura $T = 10^{29}$ K, a força GUT dividiu-se, dando origem as forças fraca e forte. A ideia mais aceita atualmente, que foi proposta pelo físico Alan Guth (1947-), é que quando houve a separação das duas forças o universo teve um momento de grande expansão, denominada *inflação*. Sem essa grande expansão, muito do que é observado atualmente, tal como, homogeneidade e isotropia não teriam uma explicação coerente com base no que se conhece de observações e teorias.

2.1.3. Era 3: Era da Interação Eletrofraca

Ocorreu entre 10^{-38} e 10^{-10} s e temperatura entre 10^{29} e 10^{15} K. Nesta era havia três forças operantes no universo: a força eletrofraca, força forte e a gravidade. Devido a força eletromagnética estar em junção à força fraca, ficou conhecida como Era da Interação Eletrofraca.

Desde a explosão causada pelo *Big Bang*, todo o espaço é preenchido por uma enorme quantidade de radiação (luz). E devido as altas temperaturas dessa radiação, apresentava também altas energias. Em um dos seus artigos, Einstein apresentou que massa e energia são equivalentes através da velocidade da luz, através da equação $E = m.c^2$.

Essa equação, umas das mais famosas da física, tem por intuito mostrar que a energia seria a forma de origem da substância do universo. Deste modo, a matéria seria energia condensada e tangível. Utilizando mais uma analogia, pode-se explicar o fenômeno através de uma pedra, ao imaginar que dureza e resistência mostram a energia condensada representada por ela; utilizando um martelo é possível deixar a pedra esmigalhada ou até mesmo quebrar o martelo. Para conseguir deixar a pedra em pedaços tão pequenos quanto os átomos que a compõe é preciso muita energia. A energia e massa/matéria são, então, duas faces da mesma moeda. Essa proporcionalidade entre massa e energia é o que denota a equação proposta por Albert Einstein. Desde a Era Planck, se for seguir essa proporcionalidade entre massa e energia, a radiação (luz) e partícula eram produzidas e destruídas de forma contínua no Universo, conforme mostra a Figura 3.



Figura 3 - Constituição e destruição de partículas: proporcionalidade massa e energia de Einstein (BRITO; MASSONI, 2019)

Quando o universo atinge $t = 10^{-10}$ s, a força fraca se separa da força eletromagnética, fazendo com que as quatro forças (gravidade, forte, fraca e eletromagnética) comecem a atuar individualmente no universo. É nesta fase também que a teoria prognostica a formação dos bósons, que são as partículas mediadoras das forças (por exemplo, o fóton no caso da força eletromagnética) que possuem *spin* inteiro.

2.1.4. Era 4: Era das Partículas

Essa era teve início entre 10^{-10} e 10^{-3} s e uma temperatura de 10^{12} K. Como descrito anteriormente, as quatro forças estavam separadas nessa fase e a produção de energia-massa estavam em quase completo equilíbrio, isto é, os fótons (partículas de luz) estavam em equilíbrio com o número de partículas (massa). Devido a diminuição de temperatura, acaba se tornando praticamente impossível esse processo ocorrer de forma espontânea, fazendo com que os fótons venham a dominar a energia do universo. Nesse intervalo de tempo, os fótons são transformados em uma complexidade de partículas raras, abrangendo os *quarks*, que são partículas que dão origem aos prótons e aos nêutrons. Ao final dessa era, o universo estava cheio de partículas como os prótons, nêutrons, elétrons e neutrinos, porém não de forma arranjada/ligada. Para cada uma das partículas criadas, sua antipartícula (partícula com mesma propriedade, mas com cargas opostas) também era criada. Por algum motivo que a física ainda não explica, o número de prótons superou o número de antiprótons produzidos, contudo algum fenômeno físico precisava ter acontecido, visto que se essa razão fosse de um para um, os prótons seriam convertidos em fótons ao terem contato com suas antipartículas, o que não é observado nos tempos atuais. Devido a essa interação desproporcional de matéria (prótons) e antimatéria (antiprótons), é que a tabela periódica dos elementos químicos é constituída de “matéria ordinária”, responsável por compor a maior parte da matéria visível do universo, como, por exemplo, galáxias, estrelas e planetas (BRITO; MASSONI, 2019).

2.1.5. Era 5: Era da Nucleossíntese

Essa era corresponde entre 10^{-3} s e 5min de “vida” do universo, onde a temperatura compreendia de 10^{12} a 10^9 K. As sobras do processo de aniquilação da antimatéria, os prótons e nêutrons começam a se fundir em núcleos mais pesados nessa fase. A junção de prótons, nêutrons e elétrons constroem todos os elementos químicos da tabela periódica. Um nêutron livre possui cerca de 10 minutos de vida antes de virar um próton, e nessa era, o universo possuía uma abundância de prótons e nêutrons. Com a temperatura na casa dos 10^9 (implica em radiação

de alta energia) muitas dessas partículas não se juntavam. Contudo, foram nos 5 primeiros minutos de existência do universo que o deutério (D ou ^2H), o trítio (^3H), e os isótopos ^3He , ^4He e ^7Li foram formados no universo. O deutério foi produzido através de colisões de prótons e nêutrons. O ^3He foi formado a partir da captura de um próton pelo deutério ou através de colisões que envolviam dois núcleos de deutério, o que poderia originar também o trítio. Já o ^4He foi formado pela captura de um deutério pelo trítio ou pela colisão de dois núcleos de ^3He (BRITO; MASSONI, 2019).

As reações nucleares podem se descritas através da notação: $A + B \rightarrow C + D$, escrita em muitos lugares como $A(B, C)D$, onde A e D são os nuclídeos e B e C são as partículas leves como os nêutrons (n), prótons (p), uma partícula alfa (α), um elétron (e^- ou β^-), um pósitron (e^+ ou β^+), um fóton (γ) ou um neutrino (ν). (BRITO; MASSONI, 2019).

As principais reações que ocorreram na Era da Nucleossíntese estão descritas na Figura 4 e Tabela 1.

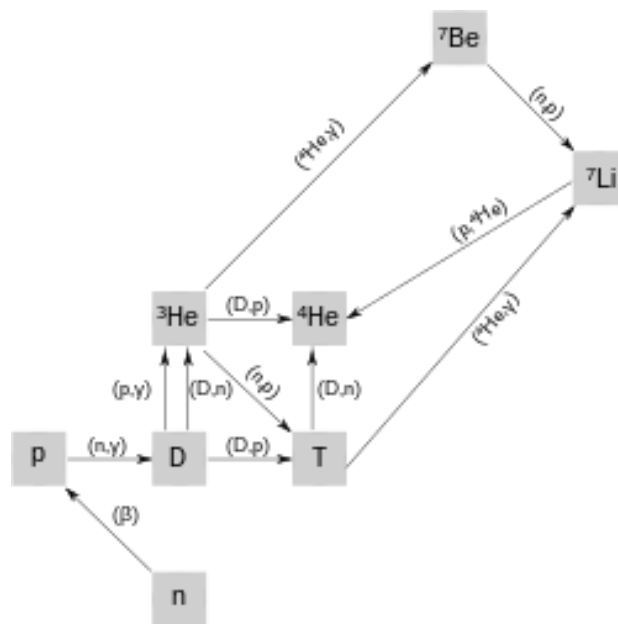


Figura 4 - Representação da produção dos elementos químicos primordiais com $T = ^3\text{H}$ (BRITO; MASSONI, 2019)

Tabela 1 - Reações Nucleares da Era da Nucleossíntese

$p + n \rightarrow D + \gamma$	$^3\text{H} + D \rightarrow ^4\text{He} + n$
$D + n \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$	$^3\text{He} + p \rightarrow ^4\text{He} + \gamma$
$D + p \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$	$^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2p + \gamma$
$D + D \rightarrow ^4\text{He} + \gamma$	$^3\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^7\text{Li} + \gamma$
$D + D \rightarrow ^3\text{H} + n$	$^7\text{Li} + p \rightarrow ^4\text{He} + \alpha$

$D + D \rightarrow {}^3\text{H} + p$	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$
${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{He} + p$	${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu$
${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	

Fonte: tabela adaptada do livro *Astrofísica para a Educação Básica* (BRITO; MASSONI, 2019)

Devido a não existência estável de núcleos com massas entre 5 e 8, percebe-se que o universo era formado primordialmente de 75% de hidrogênio (H) e cerca de 25% de hélio (He), com traços de Lítio (Li) e Deutério (D). O hélio e o hidrogênio são dessa maneira considerados elementos primordiais, por terem sido formados nos primeiros cinco minutos de existência do universo. A Nucleossíntese Primordial se encerra com a formação de ${}^7\text{Li}$. Por conta das baixas densidades e temperaturas alcançadas no final da Era da Nucleossíntese, os demais elementos não puderam ser formados (BRITO; MASSONI, 2019).

2.1.6. Era 6: Era da Recombinação

Essa era corresponde ao período de tempo de 380 mil anos após o *Big Bang*, onde a temperatura caiu para cerca de 3000 K. Conhecida como a “linha” tênue que separa o que denominam de “domínio da radiação” (preeminência de fótons) e “domínio da matéria” (preeminência de átomos) na história térmica do universo. Nessa época, o universo nada mais era do que uma “sopa” superquente de hidrogênio, hélio e elétrons livres. Os átomos nos primórdios do universo estavam completamente ionizados, isto é, com ausência de elétrons, por conta da alta temperatura do gás. Deste modo, a radiação que chegava era espalhada de imediato (através de colisões) pelos elétrons dessa “sopa”. Os núcleos da “sopa” não conseguiam capturar os elétrons para conseguirem se transformar em um átomo neutro devido aos elevados campos de radiação que ionizavam o gás em uma fração de segundos.

Contudo, após 380 mil anos da grande explosão, com a temperatura reduzindo para a casa dos 3000 K, os átomos de hidrogênio e hélio finalmente tiveram a capacidade de capturar elétrons e formarem átomos neutros. Devido a essa ausência de elétrons no meio, este tornou-se transparente (sem interrupções, o que favoreceu a colisão e o espalhamento). Os fótons da radiação puderam assim viajar livremente pelo espaço. Essa “linha” tênue ficou conhecida como ao último espalhamento por conta do espalhamento dos fótons pelos elétrons, onde a radiação cósmica de fundo (forma de radiação eletromagnética) foi gerada. A detecção dessa radiação deu mais credibilidade a teoria do *Big Bang* e quaisquer outras teorias da formação do

universo que viessem à tona posteriormente tinham que explicar a origem dessa detecção. A radiação cósmica de fundo nada mais é do que campo de radiação isotrópico (igual em todas as direções), com uma temperatura de cerca de 3 K. Como dito anteriormente, a temperatura do universo nessa era ficava na faixa de 3000 K, todavia, nos dias atuais, essa temperatura é da ordem de 3 K. Essa temperatura mostra que o espectro do “corpo negro” (na física, um objeto hipotético que absorve toda a radiação eletromagnética que incide sobre ele) da radiação cósmica de fundo tem frequência de pico próximo a 160,4 GHz, correspondendo a um comprimento de onda de 1,9 mm (comprimento de ondas milimétricas), demonstrando a radiação como do tipo rádio. Hoje sabemos que a radiação de fundo apresenta regiões de inhomogeneidade, relacionadas com regiões de diferentes densidades no Universo na época da recombinação e, portanto, responsáveis pela formação de estruturas como galáxias, estrelas e planetas (BRITO; MASSONI, 2019).

2.1.7. Era 7: Era das Estruturas

Após resfriamento do universo a uma temperatura menor que 3000 K, a “sopa” passou a ser constituída de átomos neutros, elétrons, íons e grande quantidade de fótons. Nessa era a gravidade supera a expansão cósmica, ajudando a ter uma variação cósmica no universo, fazendo com que esses átomos, elétrons e íons se juntem para formarem conglomerados moleculares enormes (constituídos de gás e poeira), frios (cerca de 10 a 20 K) e com densidade alta, lugar onde serão os berçários estelares. As primeiras galáxias e estrelas surgem cerca de 1 bilhão de anos após a grande explosão. Ainda não existe um consenso na comunidade científica do que surgiu primeiro, se foram as estrelas ou as galáxias (Figura 5 e 6, respectivamente).



Figura 5 - Pilares de formação de estrelas capturado pelo telescópio James Webb (NASA, 2022)



Figura 6 - Grupo de galáxias conhecido como o Quinteto de Stephan, capturo pelo telescópio James Webb (NASA, 2022)

2.1.8. Era 8: Era Presente

Nos dias atuais, os processos de formação de estrelas e galáxias continuam acontecendo. As posteriores gerações de estrelas são as responsáveis por criarem os elementos mais pesados da tabela periódica, isto é, todos os elementos naturais, com exceção, claro, do hidrogênio e do hélio. Muitos sistemas de planetas são formados ao redor de estrelas, e pelo que se sabe, até os dias de hoje, o planeta Terra, presente na galáxia Via Láctea é o único que possui vida. Porém, há muito ainda para se investigar perto dos bilhões de planetas, estrelas e galáxias existentes (BRITO; MASSONI, 2019).

2.2. Estrelas

As estrelas são objetos astronômicos de fundamental importância para os alicerces de construção das galáxias. A idade, distribuição e composição das estrelas em uma determinada galáxia são capazes de traçar a história da evolução dessa galáxia. Ademais, elas são responsáveis por fabricar e distribuir a grande maioria dos elementos conhecidos pela humanidade, como o carbono, nitrogênio e oxigênio.

Estrela pode ser definida fisicamente como um plasma (gás altamente ionizante devido as altas temperaturas) contido gravitacionalmente, emitindo altos níveis de radiação por conta das suas reações termonucleares. É no seu interior que ocorrem as reações de fusão nuclear, responsável por formarem os elementos químicos, e por meio deste processo ocorre a liberação de energia (PEIXOTO, 2017).

2.2.1. Formação Estelar

As estrelas são formadas dentro de nuvens de poeira, denominadas nebulosas, que se espalham pela maior parte das galáxias. A turbulência no interior dessas nuvens faz com que o gás e a poeira comecem a colapsar através da sua própria atração gravitacional. A temperatura do material no interior da nebulosa tende a aumentar a partir desse colapso. Esse núcleo quente é conhecido como protoestrela, e é ele que se tornará uma estrela algum dia. Nem todo gás e poeira formam uma estrela, sendo que o material restante pode porventura tornar-se planetas, asteroides ou até mesmo permanecer como poeira.

Como já citado, o hidrogênio e o hélio são os elementos primordiais do universo e mais abundantes atualmente, sendo formados nos primeiros cinco minutos após o *Big Bang*. São estes elementos que constituem o meio interestelar, ou seja, o material entre as estrelas. Gravitacionalmente, este material se junta à poeira interestelar, formado basicamente, por silicatos e originam as nuvens moleculares (nebulosas gasosas), chamadas de berçários estelares. Importante destacar que os grãos de poeira se formaram depois da primeira geração de estrelas enriquecer o meio interestelar com elementos químicos como silício e oxigênio.

Essas nuvens moleculares possuem uma massa elevada, cerca de 10^5 vezes a massa do Sol (uma massa solar equivale a $1,99 \times 10^{30}$ kg). As nebulosas são densas e frias, pois caso não o fossem frias, a força da gravidade não conseguiria juntar a matéria; a temperatura é proporcional à velocidade das moléculas, iria vencer a atração.

As nebulosas, quando perturbadas gravitacionalmente acabam sofrendo colapso gravitacional devido ao seu próprio peso. Nesse processo de colapso, a nuvem gasosa transforma-se em vários fragmentos que terão valores de massa divergentes, sendo possível chegar até 150-200 vezes a massa solar. Esses adensamentos somente serão uma estrela quando esse fragmento inicial tiver massa aproximada entre 0,08 e 150-200 vezes a massa do Sol. A composição química e a massa são os principais fatores para entender a formação, evolução e também a morte das estrelas (PEIXOTO, 2017).

2.3. A Evolução das Estrelas

Pode-se dizer que uma estrela “nasceu”, a partir do momento que ela começa a fundir hidrogênio em hélio. Após formada, a evolução dela é caracterizada por duas grandezas físicas fundamentais: a luminosidade e a temperatura superficial.

A temperatura superficial associa-se à cor na superfície da estrela. O Sol possui temperatura superficial de 5.780 K. Essa temperatura que dá a cor amarelada a ele. A menor temperatura para fundir hidrogênio em hélio no núcleo estelar é na faixa de 15 milhões °C. As estrelas mais frias e mais quentes que o Sol, são mais avermelhadas ou mais azuladas que ele, respectivamente. As cores estão associadas ao comprimento de onda da máxima emissão térmica da estrela. Quanto maior a temperatura da estrela, mais energia é liberada e, portanto, mais azulada ela vai parecer em razão da maior frequência (menor comprimento de onda) da

radiação emitida em maior quantidade. Deste modo, estrelas mais vermelhas que o Sol tem uma temperatura superficial menor.

A luminosidade também é um parâmetro importante das estrelas. Ela está correlacionada à potência, isto é, à afluência de energia que se origina da estrela por tempo. A variação de temperatura e luminosidade de uma estrela que delimitam sua evolução, isso ocorre devido as reações nucleares em seu interior (PEIXOTO, 2017).

2.3.1. Diagrama Hertzsprung-Russell (HR)

O diagrama foi criado e publicado de forma independente por dois cientistas, o dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873-1967) e pelo americano Henry Norris Russell (1877-1957). No diagrama (Figura 7), a principal faixa e mais marcante é denominada de sequência principal e ocupa grande parte do diagrama, que abrange desde a parte superior esquerda até a parte inferior direita. Essa sequência principal é onde as estrelas passam praticamente 90% da sua vida fundindo hidrogênio em hélio. Essa é a parte mais longa da vida de qualquer estrela. As estrelas mais luminosas e, portanto, com maior temperatura, estão no topo e a esquerda do diagrama. Comparando com o Sol, as estrelas com massas maiores e mais brilhantes possui um tempo de vida muito curto na sequência principal, cerca de poucos milhões de anos, já as estrelas com pouca massa possuem um tempo de vida médio na faixa de 10 bilhões de anos.

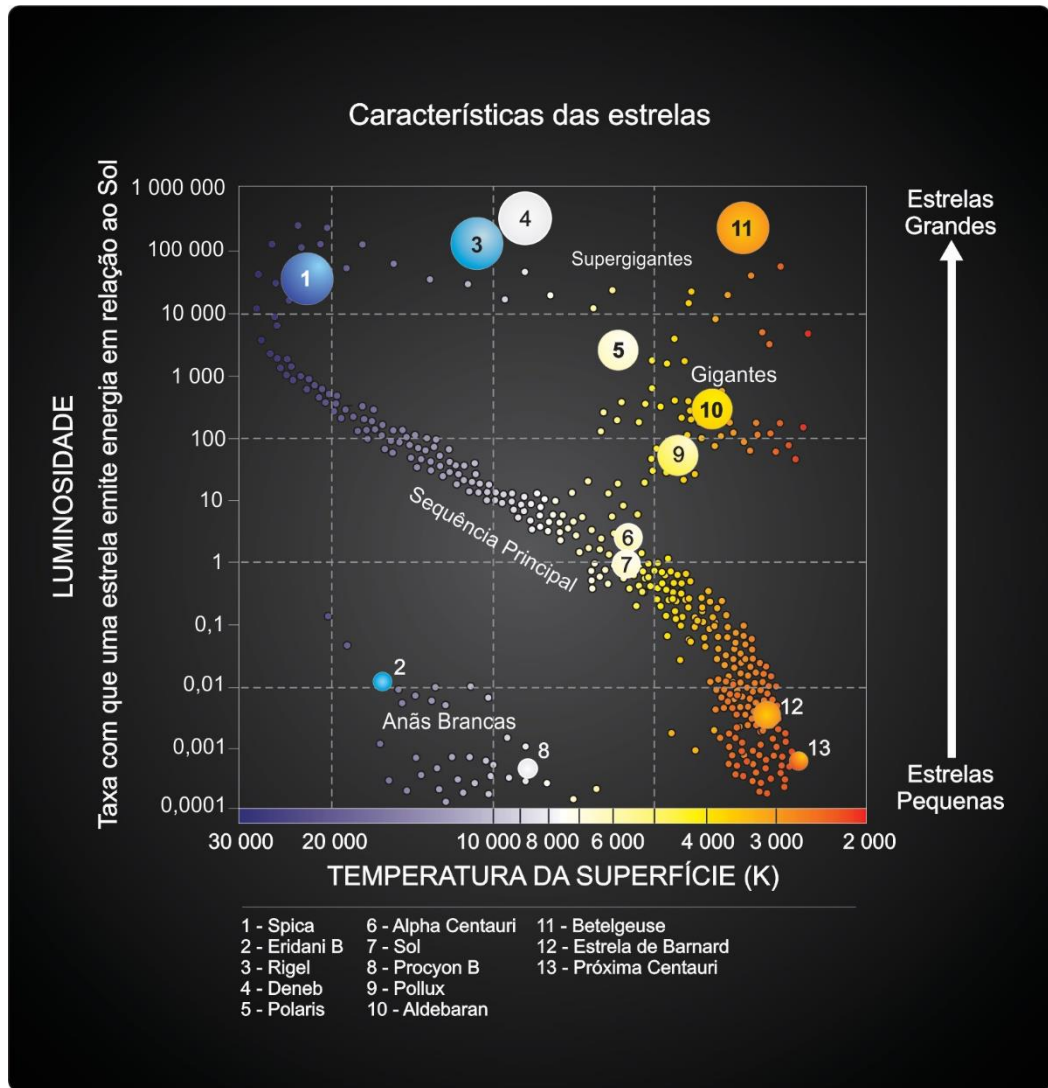


Figura 7 - Diagrama HR das estrelas: luminosidade, temperatura e tipo espectral (Saraiva; Filho, 2022)

A pergunta de qual seria a fonte de energia das estrelas sempre pairou no meio astronômico por muitas décadas. O cientista Hans Bethe (1906-2005) propôs que a fonte de energia da estrela advém das reações termonucleares que acontecem em seu interior (Figura 8). O núcleo estelar corresponde a cerca de 10% de sua massa total. Para as estrelas como o Sol é necessário milhões de kelvin para que ocorra a junção de quatro átomos de hidrogênio em um átomo de hélio, ou seja, a reação termonuclear mais básica. No processo de contração, a protoestrela (já mencionada) irá converter energia gravitacional em energia térmica. Cerca de metade da energia é irradiada para o espaço, todavia a outra metade aumentará a temperatura interna.

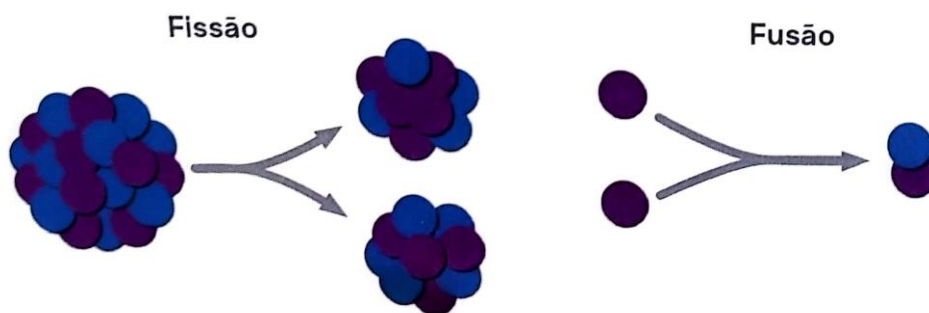


Figura 8 – Reações Nucleares (Britto; Massoni, 2019)

Com a temperatura aumentando no centro, o gás torna-se ionizado, isto é, origina-se uma mistura de elétrons livres e cargas positivas. A partir do momento que o centro atinge altas temperaturas, as reações nucleares começam a ocorrer, gerando energia suficiente para substituir a energia que está sendo emanada para fora da estrela por conta do colapso gravitacional. Ao começar a realizar o processo de fusão nuclear do hidrogênio em hélio, a protoestrela torna-se uma estrela (BRITO; MASSONI, 2019).

CAPÍTULO 3 – FORMAÇÃO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS PESADOS DA TABELA PERIÓDICA

3.1. Nucleossíntese Primordial

Conforme descrito anteriormente neste trabalho, o universo teve início a partir de uma “Grande Explosão”, conhecido como *Big Bang*. Após essa grande explosão, o universo começou a se expandir e a esfriar continuamente, o que ocorre até nos dias atuais.

Nos primeiros momentos da existência do universo, com a temperatura acima de 3 bilhões de K, existia a produção e aniquilação de algumas partículas elementares, principalmente os quarks, que se contrariavam repetidamente. Quando a temperatura baixou para menos de 1 bilhão de K, essas produções e aniquilações cessaram, formando elétrons, prótons e nêutrons, os constituintes dos átomos. A junção de prótons e nêutrons originou o primeiro elemento químico combinado do universo, o deutério (D).

Com a temperatura diminuindo ainda mais, os átomos de deutério começaram a capturar prótons e nêutrons, criando um novo elemento, formado por 2 prótons e 2 nêutrons, o Hélio

(He), conforme Figura 9. Através disso ocorria também uma reação que formava um núcleo de lítio, com 3 prótons, todavia, com uma frequência bem baixa quando comparada às demais (HUSSEIN, 2004).

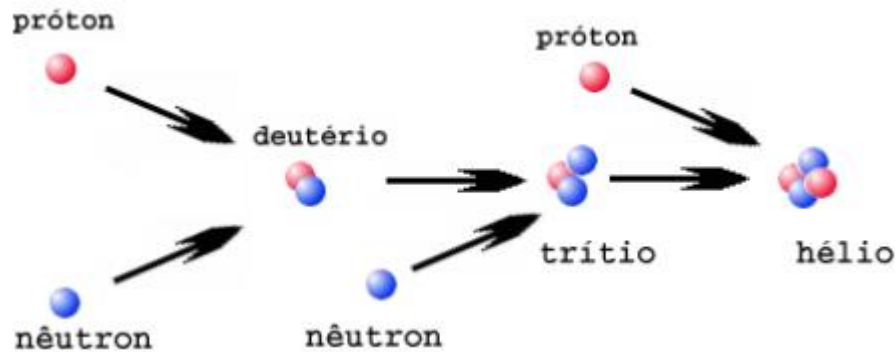


Figura 9 - Formação de Hélio durante a Nucleossíntese Primordial (USP)

A fase onde houve a maior formação de hidrogênio pesado e núcleos de ^3He e ^4He é conhecida como Nucleossíntese Primordial. Nesta etapa o universo era preenchido abundantemente por estes átomos (HUSSEIN, 2004).

O cientista George Gamow (1904-1968), postulou a teoria que o universo era formado por cerca de 75% de hidrogênio, 24% de hélio e 1% dos demais elementos atualmente conhecidos. Por essa ideia, ele deduziu que o motivo da abundância de hélio e hidrogênio foi devido terem sido formados durante o processo de Nucleossíntese Primordial nos primeiros momentos de vida do universo.

As observações que levaram em conta os valores previstos por Gamow. Por coincidência as abundâncias desses elementos no universo era praticamente a mesma da prevista. A análise espectroscópica foi a principal observação que considerou essa teoria um ponto chave no estudo da nucleossíntese.

Quando a temperatura atingiu níveis próximos de 3000 K, a Nucleossíntese Primordial parou de ocorrer, devido não ter calor o suficiente para continuar com a formação de novos elementos. A partir disso, o universo se tornou transparente à radiação. Processo conhecido como desacoplamento da matéria e da radiação (Figura 10).

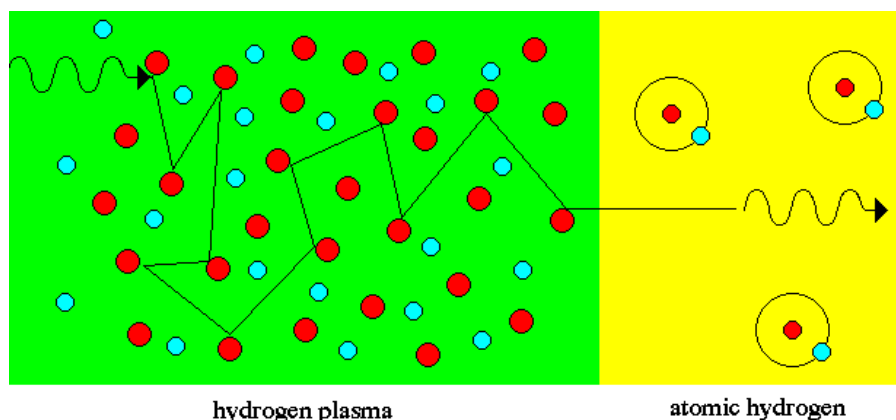


Figura 10 - Desacoplamento da Matéria e da Radiação (Bertolo, 2022)

Com a temperatura diminuindo cada vez mais, os prótons começaram a se combinar com elétrons livres, onde o primeiro átomo foi criado, o ^2H , isótopo do Hidrogênio, conhecido como Deutério. Devido o Deutério ser bem instável, alguns pares desse átomo se juntaram para formar uma molécula de Hidrogênio ($^2\text{H}_2$).

Após esses acontecimentos, a matéria tornou-se livre para condensar-se, onde passou a ser dominante no universo primordial. A radiação deixou de ser dominante e a gravidade entra em ação atraindo matéria para as regiões mais densas, fazendo com que grandes nuvens moleculares fossem criadas, dando origem as estruturas como estrelas e galáxias (PEDROSA, 2013).

Recentemente, os novos parâmetros de física atômica para os isótopos envolvidos nas cadeias de reações nucleares da nucleossíntese primordial, em combinação com os novos cálculos de densidade bariônica obtido pela análise da radiação cósmica de fundo, levam a uma previsão de abundâncias quase perfeita com os valores medidos nas estrelas por espectroscopia. A única e importante exceção é o famoso “problema do lítio”: as abundâncias previstas de ^7Li pela teoria são três vezes maiores do que os valores medidos. Alguns avanços foram obtidos na tentativa de resolver esse problema, mas ele ainda permanece uma peça a ser encaixada na estrutura da teoria do *Big Bang*.

3.2. A Nucleossíntese Estelar

A chamada nucleossíntese estelar é um conjunto de mecanismos que, coletivamente, explicam a produção dos elementos químicos no interior das estrelas. É um campo de estudo bastante complexo e interdisciplinar, uma vez que necessita de parâmetros precisos sobre a estrutura nuclear dos isótopos envolvidos, dos tempos de decaimentos radioativos, das seções de choques das interações, em combinação com os modelos de estrutura e evolução das estrelas, interação da radiação com a matéria e a teoria das atmosferas estelares (BRITO; MASSONI, 2019).

No início da nucleossíntese estelar ocorre a queima do hidrogênio para formação de hélio e energia (Figura 11), mesmo processo que ocorre no Sol atualmente e que caracteriza a fase de sequência principal. Praticamente todas as estrelas passam grande parte da sua vida na chamada sequência principal, assunto já abordado neste trabalho.

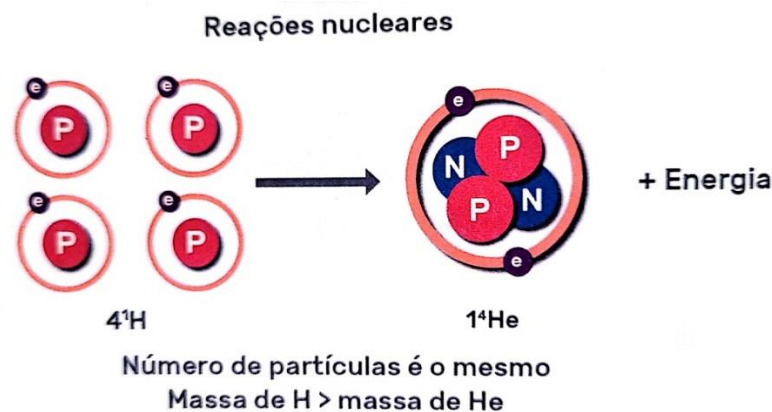


Figura 11 - Representação esquemática da queima hidrostática de hidrogênio em hélio (BRITTO; MASSONI, 2019)

3.2.1. Reação de Cadeia Próton-próton

No núcleo de estrelas menos massivas ocorrem reações denominadas de cadeia próton-próton (p-p). Essa reação pode ser definida como a junção de quatro hidrogênios para formação de um núcleo de ${}^4\text{He}$. O ciclo p-p opera dependendo da temperatura, de três formas diferentes, chamadas de PPI, PPII e PPIII.

A cadeia PPI é a mais simples e acontece no núcleo da estrela quando ela atinge 5 milhões de graus Celsius. Nessa etapa da cadeia, dois prótons se fundem formando o núcleo de ${}^2\text{He}$, emitindo um pósitron (e^+ , partícula semelhante ao elétron, todavia com carga positiva;

conhecida por “antieletron”) originando um núcleo de deutério (^2H) e um neutrino (ν , partícula subatômica que não possui carga). A seguir, o deutério une-se com um próton para gerar o ^3He , e ao mesmo tempo dois núcleos de ^3He unem-se para assim formar um núcleo de ^4He e dois núcleos de hidrogênio.

Na cadeia PPII, o ^3He une-se ao ^4He para formar ^7Be , que quase instantaneamente forma o ^7Li e um neutrino. Depois disso, o lítio captura um próton e forma ^8Be , sendo quebrado em dois núcleos de ^4He . Esse processo é de grande importância para o processo de envelhecimento da estrela, pois ele será relevante apenas quando a temperatura nuclear atinge cerca de 15 milhões de graus Celsius.

Enfim, na cadeia PPIII, o ^7Be reage de duas maneiras: se opondo ao que é conhecido, formar ^7Li a partir da captura de um elétron, o ^7Be pode reagir com um próton formando ^8B e liberando um raio gama; o ^8B depois disso emite um pósitron e um neutrino formando ^8Be , repartindo-se em dois núcleos de ^4He . Essa cadeia se faz importante para quando a temperatura nuclear atinge cerca de 25 milhões de graus Celsius. Se comparada a uma estrela do tamanho do Sol, em praticamente 69% do tempo a cadeia PPI domina; 31% é dominada pela PPII e aproximadamente 0,3% é dominada pela cadeia PPIII (BRITO; MASSONI, 2019). Na tabela 2, as reações nucleares p-p estão exemplificadas.

Pelo ^8Be possuir um tempo de vida de cerca de 10^{-19}s , acaba sendo altamente instável, decaindo em outro elemento praticamente no mesmo momento de sua formação. A formação dos elementos mais pesados, com enfoque no Carbono devem quebrar essa “barreira” imposta pelo Be.

Tabela 2 - Reações Nucleares da Cadeia PP

Cadeia PPI	Notação
$^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	$^1\text{H}(p, \beta^+)^2\text{H}$
$^2\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$	$^2\text{H}(p, \gamma)^3\text{He}$
$^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2^1\text{H}$	$^3\text{He}(^3\text{He}, 2p)^4\text{He}$
Cadeia PPII	Notação
$^3\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^7\text{Be} + \gamma$	$^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}(\beta^-, \nu) ^7\text{Li}$
$^7\text{Be} + e^- \rightarrow ^7\text{Li} + \nu_e$	
$^7\text{Li} + ^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He}$	$^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$
Cadeia PPIII	Notação

${}^7\text{Be} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$	${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}(\beta^-, \nu){}^8\text{Be}(\alpha){}^4\text{He}$
${}^8\text{Be} \rightarrow 2{}^4\text{He}$	

Fonte: tabela adaptada do livro *Astrofísica para a Educação Básica* (BRITO; MASSONI, 2019)

3.2.2. Ciclo CNO

Esse ciclo foi proposto por Hans Bethe (1906-2005), um pouco depois da descoberta do nêutron, no século XX. Neste ciclo, a transformação de hidrogênio em hélio ocorre com a participação do carbono, do nitrogênio e do oxigênio, que não fazem parte da ligação e são utilizados somente como catalisadores das reações, isto é, são consumidos e regenerados durante os processos de fusão, não participando da reação em si.

Vale destacar que a ocorrência do ciclo CNO depende da presença dos elementos carbono, nitrogênio e oxigênio na composição química da estrela, de modo que ele não deve ter acontecido na primeira geração de estrelas, formadas exclusivamente com o material proveniente do Big Bang. Assim, o ciclo CNO deve aparecer apenas em estrelas das gerações posteriores, formadas em nebulosas já enriquecidas pelas explosões das estrelas da primeira geração (BRITO; MASSONI, 2019).

As principais reações do ciclo CNO estão descritas na tabela 3 e na Figura 12.

Tabela 3 - Principais Reações Nucleares do Ciclo CNO

Ciclo CNO I	Ciclo CNO II
${}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$	${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{16}\text{O} + \gamma$
${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$	${}^{16}\text{O} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{17}\text{F} + \gamma$
${}^{13}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$	${}^{17}\text{F} \rightarrow {}^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e$
${}^{14}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$	${}^{17}\text{O} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + {}^4\text{He}$
${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$	
${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$	

Fonte: tabela adaptada do livro *Astrofísica para a Educação Básica* (BRITO; MASSONI, 2019)

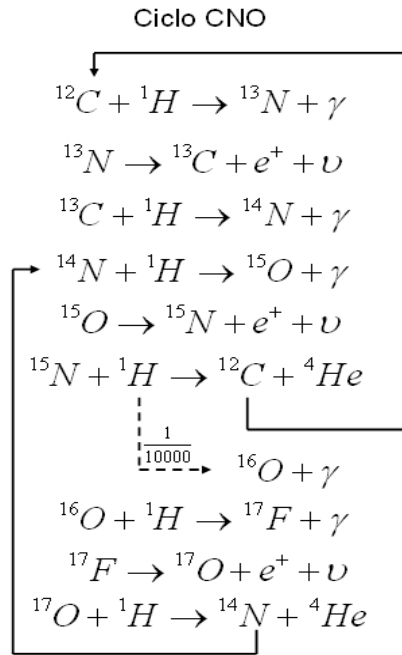


Figura 12 - Queima Hidrostática de Hidrogênio em Hélio através do Ciclo CNO (BRITO; MASSONI, 2019)

A principal parte do ciclo CNO ocorre quando ^{12}C captura um próton (^1H) tornando-se ^{13}N , que acaba emitindo um pósitron (e^+), tornando-se ^{13}C . Por sua vez, o ^{13}C absorve um próton (^1H) e transforma-se em ^{14}N . Um próton (^1H), por fim, é absorvido pelo ^{14}N , que instantaneamente produz uma partícula α (^4He), deixando como resquício o ^{12}C também. O ciclo acaba se repetindo.

Em resumo o ciclo CNO se divide em quatro cadeias principais, listadas abaixo e organizadas na figura 13:

- CNO I – $^{12}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+, \nu)^{13}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}(\beta^+, \nu)^{15}\text{N}(\text{p}, \alpha)^{12}\text{C}$;
- CNO II – $^{16}\text{O}(\text{p}, \gamma)^{17}\text{F}(\beta^+, \nu)^{17}\text{O}(\text{p}, \alpha)^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}(\beta^+, \nu)^{15}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{16}\text{O}$;
- CNO III – $^{16}\text{O}(\text{p}, \gamma)^{17}\text{F}(\beta^+, \nu)^{17}\text{O}(\text{p}, \gamma)^{18}\text{F}(\beta^+, \nu)^{18}\text{O}$; $^{18}\text{O}(\text{p}, \gamma)^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$ ou $^{18}\text{O}(\text{p}, \alpha)^{15}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{16}\text{O}$;
- CNO IV – alguns poucos núclídeos conseguem escapar do ciclo CNO através do ^{19}F para conseguir formar ^{20}Ne .

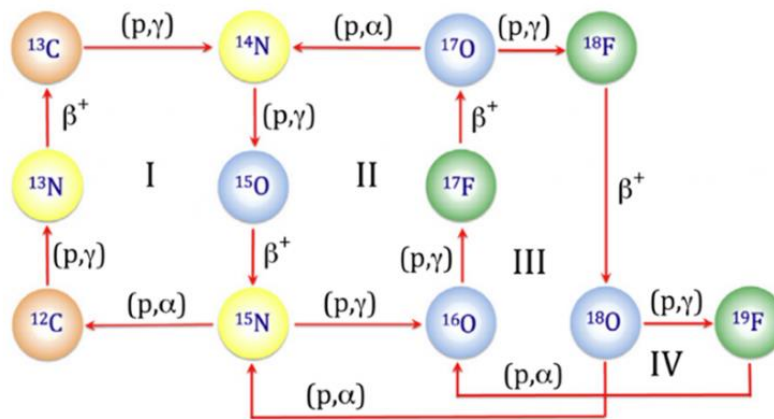


Figura 13 - Cadeia de Reações do ciclo CNO I, II, III e IV (COCOCUBED, 2022)

Em temperaturas maiores do que $1,8 \cdot 10^7$ K no caroço estelar, a quantidade de energia liberada pelo ciclo CNO é maior do que a quantidade liberada pela cadeia próton-próton. No caso do Sol, essa temperatura é da ordem de $1,5 \cdot 10^7$ K e, portanto, a cadeia p-p ainda é responsável pela maior quantidade da energia emitida por nossa estrela.

3.2.4. Queima do Hélio

Após todo o hidrogênio ser fundido, não existirá nada a mais do que núcleos de hélio. Nesta etapa a temperatura da estrela sobe absurdamente, atingindo números na faixa de 100 milhões de graus Celsius.

Nas temperaturas mais altas que 10^8 K, em condições de núcleos estelares, a abundância de ^4He é de certa maneira alta, podendo assim haver reações com envolvimento de 3 partículas, onde ocorre o processo conhecido como triplo- α de queima do hélio (Figura 14) (BRITO; MASSONI, 2019).

PROCESSO ALFA-TRIPLO

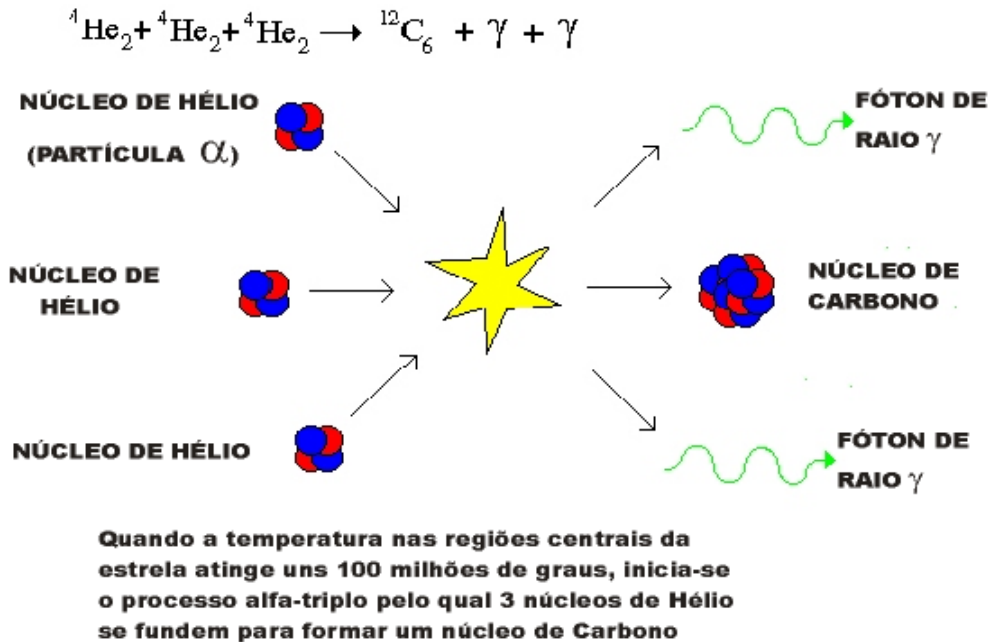
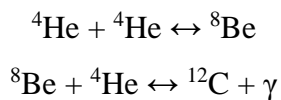


Figura 14 - Processo Triplo-alfa (UFRGS, 2022)

As reações são as seguintes:

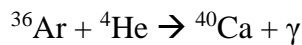
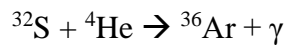
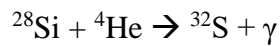
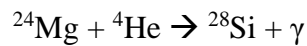
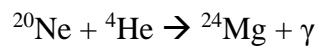
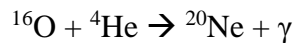
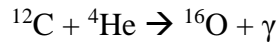


O ${}^8\text{Be}$ que é produzido durante essa primeira etapa é muito instável, e acaba decaindo novamente em dois núcleos de hélio em cerca de $2,6 \times 10^{-16}$ s. Quando o carbono entra em cena e finalmente começa a ser produzido, a estrela inicia uma nova fase de fusão nuclear em seu interior. Entretanto, por conta das reações de queima de hidrogênio em hélio que ainda ocorrem nas camadas mais afastadas no núcleo, a pressão de radiação entra em desequilíbrio e provoca a expansão da atmosfera da estrela, acompanhada de um resfriamento dessas camadas externas. Assim, a estrela fica muito maior e com temperatura superficial menor, adquirindo por isso uma cor avermelhada e entrando na fase conhecida como gigante (ou supergigante) vermelha.

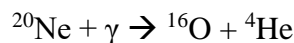
Durante alguns milhões de anos, a estrela vai se encher de carbono e o elemento se tornará primordial para a formação de novos elementos. Porém, dependendo da massa inicial da estrela, todo o hélio pode ser transformado em carbono pelo processo triplo- α , originando um núcleo de carbono.

3.2.5. Fases Finais da Nucleossíntese Estelar

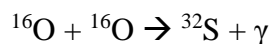
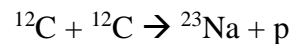
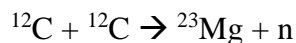
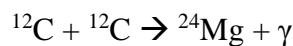
As etapas finais de queima e produção de elementos vai depender principalmente da massa da estrela. Nos sistemas massivos, ou seja, aquelas estrelas com massa entre 8 e 100 massas solares, a síntese de elementos pesados ocorre com a queima do carbono em temperaturas da ordem de 10^9 K pelas reações abaixo:

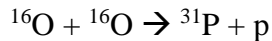
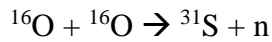


Esses elementos são conhecidos como núcleos- α e o processo descrito acima é o processo- α , pois as reações envolvem a captura de uma partícula alfa. Vale destacar que para temperaturas maiores que 10^9 K, a queima do neônio pode ocorrer também pela reação de fotodesintegração:



Ainda, alguns dos núcleos- α podem ser produzidos por processos de queima sem a participação da partícula alfa, conforme as reações mostradas abaixo:





O último estágio de fusão antes da estrela não mais conseguir deter o colapso gravitacional é a queima do silício. Este processo, embora seja descrito muitas vezes na forma $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Fe} + \gamma$, ele não é uma verdadeira reação de fusão e não consiste em juntar 2 silícios para formar ferro. A queima do silício ocorre através do processo de fotodissociação e da captura de partículas leves (α , p, n), sob condições próximas ao equilíbrio estatístico, produzindo elementos próximos ao pico do ferro.

As sucessivas etapas de queima no caroço da estrela são acompanhadas pela queima das camadas externas vizinhas, produzindo uma estrutura parecida com uma “casca de cebola” (figura 15), onde elementos tão pesados quanto o ferro são criados em seu interior. O núcleo é composto principalmente de ^{56}Fe , mas também de isótopos subdominantes de ^{48}Ca , ^{50}Ti , ^{54}Fe , ^{58}Fe e ^{62}Ni . A primeira concha que envolve o núcleo tem uma composição dominada pelo ^{28}Si , mas há também outros isótopos como resultado das reações, principalmente ^{32}S , ^{40}Ca , ^{40}Ar e ^{58}Fe . A concha concêntrica seguinte está composta principalmente de ^{16}O com traços de ^{20}Ne , ^{24}Mg e ^{28}Si . Segue uma camada de ^4He com abundâncias menores de ^{18}C , ^{20}N e ^{16}O . A última e mais externa contém hidrogênio e ^4He e alguns traços de elementos mais pesados caso a estrela não seja de primeira geração.

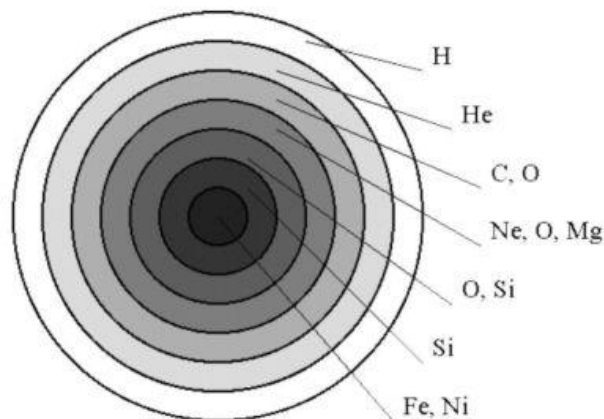


Figura 15 - Estrutura esquemática das diferentes camadas de uma estrela massiva completamente evoluída, identificando os seus principais elementos químicos (IPAC, 2011)

Os estágios posteriores da evolução estelar induzem o objeto a um colapso e explosão, pois a partir do ferro as reações nucleares deixam de ser exotérmicas e começam a consumir

energia para acontecer. Com isso, o material produzido é ejetado no universo por meio de uma supernova tipo II e pode ser utilizado na composição de estrelas de futuras gerações.

As estrelas com massas até 8 vezes a massa do Sol interrompem a queima nuclear com a formação de um caroço inerte de carbono e oxigênio, ejetando suas camadas externas por meio de ventos estelares muito intensos conhecidos como nebulosas planetárias. O caroço, ainda quente e brilhante passa a ser chamado de anã branca. Entretanto, antes da emissão do envelope, a estrela em fase de gigante vermelha passa por processos convectivos conhecidos por dragagem e fazendo a estrutura ser conhecida por estrela do ramo assintótico (AGB), como mostra a figura 16. Nessa etapa, ocorre um aumento significativo da abundância de He, N e O (MACIEL, 2020).

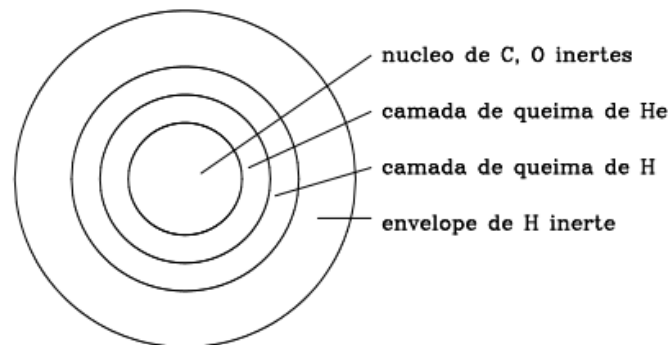


Figura 16 - Estrutura Estelar no Ramo Assintótico das Gigantes (MACIEL, 2020)

É importante lembrar que as estrelas anãs brancas, quando em sistemas binários, podem ainda ganhar massa por transferência, ou seja, sua estrela companheira ainda está na fase de gigante vermelha e começa a transferir matéria, que se acumula na superfície da anã branca (figura 17). Neste sistema, quando a anã branca chega a um limite de 1,44 vezes a massa do Sol, ela entra em colapso e explode (supernova tipo Ia), originando grandes quantidades de ferro e elementos alfa.

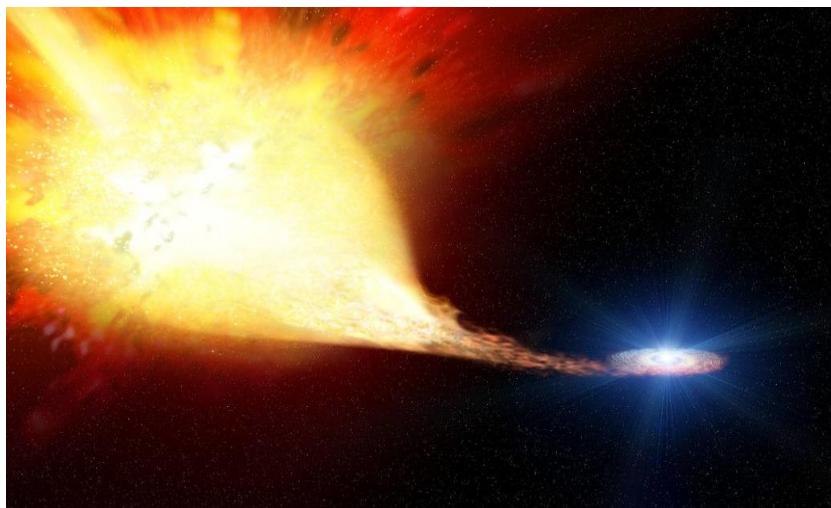


Figura 17 - Representação de um sistema duplo cuja explosão recebe o nome de supernova tipo Ia (NASA, 2018)

3.3. Formação dos Elementos Químicos Pesados da Tabela Periódica

3.3.1. Nucleossíntese Explosiva e processos de captura de nêutrons

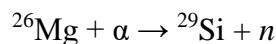
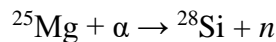
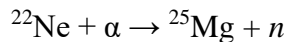
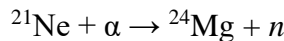
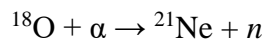
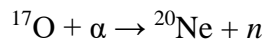
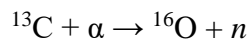
O ferro é o elemento mais estável da tabela periódica. Caso fosse possível submeter todos os elementos químicos da tabela periódica a energias muito altas a ponto de conseguir separá-los em suas partículas constituintes, o ferro seria o mais trabalhoso, pois exigiria muito mais energia. É o elemento que possui a maior energia de ligação. Devido a isso, torna-se impossível o processo de produção dos elementos mais pesados no interior das estrelas, e como resposta, a ainda estrela de alta massa explode como uma supernova do tipo II (JUNIOR, 2013).

Como origem dessa explosão, uma grande quantidade de oxigênio e de outros elementos como Mg, Si, Ca e Ti são formados em uma escala de milhões de anos (tempo médio que essas estrelas de alta massa levam da sua formação à sua morte). Após a explosão de uma supernova tipo II, o material remanescente do núcleo pode ser chamado de estrela de nêutron (fim da “vida” das estrelas com massa entre 10 e 25 vezes a massa do Sol) ou buraco negro (fim de “vida” de estrelas com massa superior a 25 vezes a massa do Sol).

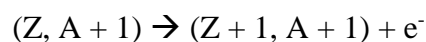
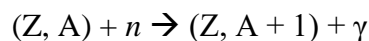
Depois da explosão de uma supernova tipo II, uma variedade de elementos do pico do ferro (Fe, Mn, Co, Zn, Cu, entre outros exemplos) é expelido para o meio interestelar, que fica permeado por uma “sopa” de prótons e elétrons, algumas das partículas que constituam o centro da estrela antes da explosão. Prótons e elétrons quando combinados produzem uma grande quantidade de nêutrons e liberam neutrinos. Como resultado desse processo, o meio interestelar

se enche de nêutrons livres, tornando-se favoráveis à captura pelos elementos do pico do ferro presentes na “sopa” pós explosão. Essa captura de nêutrons, seja lenta (processo-s) ou rápida (processo-r) é que acaba produzindo os elementos químicos da tabela periódica com massa atômica (Z) superior a 26, isto é, todos os elementos químicos acima do ferro. O ambiente pós explosão de uma supernova tipo II é, teoricamente, o mais propício para a produção dos elementos pesados por meio da captura rápida (processo-r) de nêutrons. Vale destacar que, no caso das partículas carregadas, a repulsão eletrostática aumenta com o peso atômico, o que dificulta os processos de fusão, fazendo com que os mecanismos de captura de partículas leves sejam mais eficientes.

A ação de cada um dos mecanismos, o processo-s (*slow*, do inglês) e processo-r (*rapid*, do inglês), dependerá do fluxo de nêutrons disponível. Nestes processos, um núcleo central, como ^{56}Fe , captura nêutrons produzidos por diversas reações nucleares, como exemplo:



assim, formando sucessivamente elementos químicos mais pesados. Inicialmente, a captura de nêutrons leva à formação de isótopos mais pesados do mesmo elemento, os quais se tornam instáveis à medida que seu número de nêutrons aumenta. O processo continua com a emissão de um elétron, que forma um novo elemento com a mesma massa, porém com uma carga elétrica com uma unidade aumentada. Pode-se descrever essas reações como:



A ocorrência dos processos-s ou -r depende do tempo de captura do nêutron se comparado com a escala de decaimento β . Se o tempo for longo em relação ao decaimento β , tem-se o processo-s, caso contrário o processo-r.

No processo-s, que ocorre nas gigantes frias, a captura ocorre em escalas de tempo longas com relação à escala de tempo de decaimento β , que pode ficar na faixa de poucos minutos até milhões de anos. O processo alcança até o ^{209}Bi com $Z = 83$. Um exemplo de como o Fe atua como núcleo central do processo s, está mostrado conforme Figura 19.

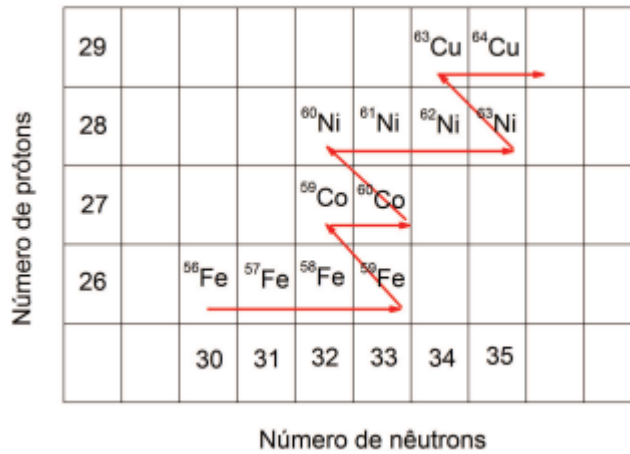


Figura 18 - Exemplo do processo-s (MACIEL, 2020)

No exemplo, o ^{56}Fe está atuando como núcleo central, capturando nêutrons originando ^{57}Fe , ^{58}Fe , ^{59}Fe e por decaimento β , ^{59}Co , que de forma similar produz o ^{60}Ni e os demais elementos e isótopos. As retas com inclinação exemplificam a ocorrência do decaimento β , onde um elétron e^- e um antineutrino de elétron $\bar{\nu}_e$ são emitidos. Em outras palavras, a cadeia de produção de núcleos do processo-s sempre irá permanecer próxima ao vale de estabilidade β da tabela de nuclídeos.

Por outro lado, durante o processo-r, as reações de captura de nêutrons, que acontecem em um intervalo de tempo menor do que a meia-vida do decaimento β , conseguem produzir isótopos ricos em nêutrons, muito distantes do vale de estabilidade. Ao final do fluxo de partículas, os decaimentos radioativos começam a acontecer. Ainda não se sabe o local de ocorrência desse processo na natureza, sendo os modelos mais promissores as explosões de supernova tipo II, ainda que estudos recentes tenham apontado para as colisões entre estrelas de nêutrons e/ou buracos negros como outra possibilidade.

Vale ainda destacar que a origem dos elementos compreendidos entre o gálio (Ga) e o cádmio (Cd) parece ser ainda mais complexa, pois devem aparecer como contribuição de vários mecanismos combinados, como o processo-s fraco, o processo-r fraco, o processo primário de produção de elementos leves (LEPP) e o processo-p, todos eles ainda pouco conhecidos e sendo

estudados pelos especialistas da astroquímica. Isso mostra que a origem dos elementos químicos é ainda um campo em desenvolvimentos e com muitas perguntas sem respostas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após realização deste trabalho de conclusão de curso, pôde-se verificar que os estudos que abrangem a área da formação dos elementos químicos estão evoluindo bastante de alguns anos para cá. Os avanços tecnológicos no âmbito da astronomia são umas das principais contribuições atuais, principalmente quando se vê lançamentos de satélites como o Hubble e James Webb, ambos lançados pela NASA, que são capazes de mostrar imagens de locais longínquos do universo, como destacado nos parágrafos decorridos neste trabalho.

Nos capítulos iniciais é dado uma introdução ao tema, começando pela constituição fundamental do Universo, para enfim evoluir para os processos de formação dos grandes objetivos, como estrelas e galáxias, que ocorreram através de uma grande explosão, denominada *Big Bang*, teoria mais aceita atualmente para a formação de tudo que o conhecemos. Foi a partir dessa teoria, que os estudos se aprofundaram na formação elemental do universo, isto é, na origem dos elementos químicos que o compõe.

Os elementos mais simples foram criados nos primeiros minutos de existência do Universo, em um processo conhecido como nucleossíntese primordial. Todavia os demais, necessitavam de maior energia para sua formação, visto que se formam pelo processo de fusão nuclear, e isso só poderia ocorrer no interior de grandes estrelas, que surgiram apenas 1 bilhão de anos após a explosão inicial.

As grandes estrelas são capazes de realizar fusão nuclear somente até o pico do Ferro, pois para fundir ferro em elementos mais pesados é necessária muita energia, o que leva a déficit de energia na estrela, ou seja, mais gasta energia do que produz. Os elementos químicos mais pesados, em teoria, somente conseguem se formar através das grandes explosões de estrelas massivas, denominadas de supernovas tipo II. A formação ocorre através da captura de nêutrons durante a explosão da supernova, ejetando então todos os elementos naturais conhecidos ao espaço.

Ainda não existe um consenso científico e estudos muito aprofundados na área da formação de elementos químicos mais pesados. As informações decorridas levam como base teorias e postulados padrões. Porém, existem diversas teorias em estudo, conforme descrita no último capítulo deste trabalho para poderem explicar a constituição fundamental do Universo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASÍLIO, Márcio. Afinal, como se formaram os Elementos Químicos?. **Química Tecnológica**, Minas Gerais, p. 1-6, 21 fev. 2021. Disponível em: <https://www.quimicatecnologica.bh.cefetmg.br/2021/02/01/como-os-elementos-quimicos-foram-formados/>. Acesso em: 25 nov. 2022.

BRITO, Alan Alves; MASSONI, Neusa Teresinha. **Astrofísica para a educação básica: a origem dos elementos químicos no Universo**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2019. 165 p. ISBN 978-85-473-3830-5.

CAMPOS, Gabriela Camargo. **A Nucleossíntese no Universo Primordial**. Orientador: Profa. Dra. Marlete Pereira Meira de Assunção. 2020. 45 p. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Teoria da Relatividade) - Universidade Federal de São Paulo, Diadema, SP, 2020.

DE AGUIAR, Bernardo França. **Relatividade Geral**. Orientador: Prof. Dr. Marco Moriconi. 2018. 94 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Física) - Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro - RJ, 2018. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/11224/Bernardo%20Fran%20de%20Aguiar.pdf;jsessionid=ECD973843177B12E735AA2A7D5FA1F34?sequence=1>. Acesso em: 25 nov. 2022.

DE SOUZA, Ronaldo E. **Introdução à Cosmologia**. 1. ed. São Paulo: EDUSP, 2004. 328 p. ISBN ISBN-10 8531408431 / ISBN-13 978-8531408434: .

FILHO, Kepler de Souza Oliveira; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. Massa da Galáxia. *In: Massa da Galáxia*. Rio Grande do Sul, 2022. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/vialac/node5.htm>. Acesso em: 25 nov. 2022.

FILHO, Kepler de Souza Oliveira; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. Massa da Galáxia. *In: Glossário*. Rio Grande do Sul, 2022. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/vialac/node5.htm>. Acesso em: 25 nov. 2022.

FREBEL, Anna. From Nuclei to the Cosmos: Tracing Heavy-Element Production with the Oldest Stars. **Annual Review of Nuclear and Particle Science**, Canadá, v. 68, p. 237-239, 25

jul. 2018. DOI <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-101917-021141>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-nucl-101917-021141>. Acesso em: 25 nov. 2022.

GOMES E SILVA, Pollyanna Cristina. **A FORMAÇÃO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS COMO TEMA GERADOR EM AULAS DE QUÍMICA DO 1º ANO DO ENSINO MÉDIO DA EJA**. Orientador: Profo Dr. Sérgio Ricardo Bezerra dos Santos. 2016. 53 p. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Química) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2016.

GUIMARÃES, Vaidir; HUSSEIN, Mahir S. Nucleossíntese dos elementos e astrofísica nuclear. **Revista USP**, São Paulo, n. 62, 4 ago. 2004. p. 74-87.

JØRGENSEN, Jes K.; BELLOCHE, Arnaud; GARROD, Robin T. Astrochemistry During the Formation of Stars. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, Canadá, v. 58, p. 727-778, 15 jul. 2020. DOI <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-032620-021927>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-astro-032620-021927>. Acesso em: 22 nov. 2022.

JUNIOR, Cesar Henrique Siqueira Mello. **Elementos Pesados por Captura de Nêutrons nos Estágios Iniciais da Galáxia**. Orientador: Profa. Dra. Beatriz Leonor Silveira Barbuy. 2013. 203 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2013.

MACIEL, Walter J. **FUNDAMENTOS DE EVOLUÇÃO QUÍMICA DA GALÁXIA**. 1. ed. São Paulo, SP: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, 2020. 310 p. ISBN 978-65-88233-01-6. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/astrofisica/sites/default/files/feqg.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2022.

NASA (Estados Unidos). **Stars**. Estados Unidos, 2021. Disponível em: <https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/how-do-stars-form-and-evolve>. Acesso em: 25 nov. 2022.

NASA (Estados Unidos). **Discoveries | Highlights - Exploring the Birth of Stars**. Estados Unidos, 2021. Disponível em: <https://www.nasa.gov/content/discoveries-highlights-exploring-the-birth-of-stars>. Acesso em: 25 nov. 2022.

PEDROSA, Luis Adriano. **DO BIG-BANG AO URÂNIO: As Nucleossínteses Primordial, Estelar e Explosiva - Uma abordagem para o ensino médio.** PRODUTO EDUCACIONAL PUC-MG, Belo Horizonte, MG, p. 1-101, 1 jul. 2013.

PIVETTA, Marcos. A PRIMEIRA LUZ DO JAMES WEBB: Primeiras imagens do telescópio James Webb impressionam pela nitidez. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, n. 318, 31 ago. 2022. *Ciência*, p. 1. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/primeiras-imagens-do-telescopio-james-webb-impressionam-pela-nitidez/>. Acesso em: 25 nov. 2022.

RIBEIRO, Willian Peixoto. **TEORIA DO BIG BANG: SEUS PRINCÍPIOS E SUA INCOMPATIBILIDADE COM AS LEIS DA TERMODINÂMICA E OUTRAS LEIS DA FÍSICA.** Orientador: Prof. Dr. Roberto Ramos da Silva. 2017. 39 p. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Física) - Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão - SC, 2017.

SILVA, Helen Oliveira. **O uso da espectroscopia para o estudo da química estelar através dos seus espectros.** Orientador: Profa. Dra. Lisete Fischer. 2017. 58 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) - Universidade de Campo Limpo Paulista, Campo Limpo Paulista, SP, 2017.

SOARES, Domingos S.L. A idade do universo, a constante de Hubble e a expansão acelerada. **Departamento de Física, ICEx, UFMG**, Belo Horizonte, MG, p. 1-5, 25 jun. 2009. Disponível em: <http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/ageunv/idadeunv.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2022.

TEIXEIRA, Ricardo Roberto Plaza; DE SOUZA, Diego Corrêa Peres. Matéria escura, energia escura e história da ciência na educação científica. **ACTIO: Docência em Ciências**, Curitiba, PR, v. 7, n. 2, p. 1-22, 31 maio 2022. DOI 10.3895/actio.v7n2.14046. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/actio/article/view/14046>. Acesso em: 25 nov. 2022.

VELINOVA, Maria Emilova. **Elements of Astrochemistry: Chemical History of Matter in the Universe.** 1. ed. Canadá: Arcler Press, 2021. 655 p. v. 1. ISBN 978-1-77407-974-4. *E-book*.