



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS, QUÍMICAS
E FARMACÊUTICAS - CAMPUS DIADEMA**

Gabriela Camargo Campos

A Nucleossíntese no Universo Primordial

Diadema

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS, QUÍMICAS
E FARMACÊUTICAS - CAMPUS DIADEMA

Gabriela Camargo Campos

A Nucleossíntese no Universo Primordial

Trabalho de conclusão de curso apresentado como exigência parcial para obtenção do certificado de conclusão do curso de Especialização em Teoria da Relatividade, ao Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo - Campus Diadema.

Diadema

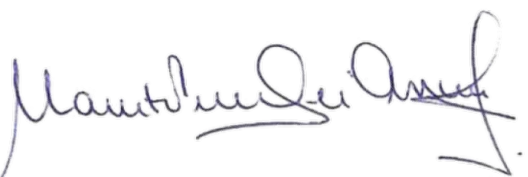
2020

A Nucleossíntese no Universo Primordial

Gabriela Camargo Campos

Trabalho de conclusão de curso apresentado como exigência parcial para obtenção do certificado de conclusão do curso de **Especialização em Teoria da Relatividade**, ao Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo - Campus Diadema.
Orientadora: Prof^a Dr^a Marlete Pereira Meira de Assunção
Co-orientadora: Prof^a Dr^a Nadja Simão Magalhães

Data da Entrega para a Comissão do TCC: 09/10/2020



Prof^a Dr^a Marlete Pereira Meira de Assunção
Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP
Orientadora



Prof^a Dr^a Nadja Simão Magalhães
Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP
Co-Orientadora.



Gabriela Camargo Campos
Candidata.

À minha família, pelo apoio na realização desse curso e trabalho.

Agradecimentos

Para a realização de um curso como esse e, em especial, do presente trabalho, muitos são os que nos ajudam, de diferentes formas.

À minha família e amigos, agradeço pelo apoio e compreensão, seja nas ausências aos sábados, seja nos momentos de trabalho e estudo necessários.

Agradeço aos colegas do curso de Especialização em Teoria da Relatividade, pela companhia aos sábados, nas aulas e fora delas, pelo companheirismo e ajuda ao longo do curso, que não só facilitaram seu cumprimento, como tornaram as manhãs, tardes e almoços de sábado mais agradáveis e divertidas. Um agradecimento especial ao Pedro Croti, sempre pronto a ajudar, compartilhar dúvidas, angústias e materiais de estudo, além de dicas sobre Samba. Também aos professores do curso, pela disposição em ministrá-lo, o diálogo e compreensão com a qual o fizeram, numa postura sempre aberta a dúvidas, sugestões e debates, fundamentais para a construção de um processo de aprendizagem profícuo.

Por fim, agradeço especialmente à Profa. Marlete Assunção e à Prof. Nadja Magalhães, por terem me orientado com dedicação, empenho e compreensão na realização deste trabalho, contribuindo em especial na área de Física Nuclear, a mais obscura para mim.

Resumo

Neste trabalho, concentramos no estudo da Nucleossíntese Primordial, abordando tanto os processos nucleares nela envolvidos, como sua importância para a história do Universo como o conhecemos, e para o desenvolvimento do Modelo Cosmológico Padrão. Optamos pela descrição desse modelo a partir da sua origem como decorrência da Teoria da Relatividade Geral. Nesse percurso, adentramos no tema do Universo Primordial, onde a nucleossíntese dos elementos químicos leves e suas abundâncias têm um papel fundamental na evolução do Universo. Por fim, apresentamos os principais métodos atuais de medida das abundâncias destes elementos, realizando uma comparação entre as previsões teóricas e os resultados observacionais.

Palavras-chave: Nucleossíntese. Universo Primordial. Abundâncias dos Elementos Leves. Cosmologia. Astrofísica. Relatividade Geral.

Abstract

In this work, we focus on the study of Primordial Nucleosynthesis, addressing the nuclear processes involved in it, as well as its importance for the history of the Universe as we know it, and for the development of the Standard Cosmological Model. We chose to describe this model from its origin as a result of the Theory of General Relativity. Along this path, we get into the theme of the Primordial Universe, where the nucleosynthesis of light chemical elements and their abundance plays a fundamental role in the evolution of the Universe. Finally, we present the main current methods of measuring these abundances, making a comparison between theoretical predictions and observational results.

Keywords: Nucleosynthesis. Primordial Universe. Light Elements Abundance. Cosmology. Astrophysics. General Relativity.

Lista de ilustrações

- Figura 1 – Edwin Hubble observou (esquerda), em 1929, que as galáxias se afastam da Terra. Em 1915, Einstein (direita) apresentou a sua Teoria da Relatividade Geral, que revolucionou, junto com as posteriores observações de Hubble, a visão que temos do universo. Fontes: <https://www.npr.org/2011/11/10/142182292/credit-controversy-who-made-key-cosmos-discovery> (esquerda) e <https://www.bbc.com/portuguese/geral-44480196> (direita) 22
- Figura 2 – Analogia em 2 dimensões do significado do parâmetro de curvatura k . No caso de $k = 1$, temos curvatura negativa, um Universo finito e curvo, no qual a soma dos ângulos internos de um triângulo é maior do que 180° . No caso $k = -1$ o espaço também é curvo, mas possui curvatura positiva e extensão infinita, sendo essa mesma soma menor que 180° . Para $k = 0$ temos um Universo plano e infinito, onde a soma dos ângulos internos de um triângulo vale 180° . Figura extraída de (NETO, 2018) . 24
- Figura 3 – Alpher, Bethe e Gamow, responsáveis pela publicação, em 1948, do primeiro modelo de nucleossíntese primordial. Fonte: <http://diaryofnumbers.blogspot.com/2013/05/scientific-paper-of-week-alpher-bethe.html>. . . . 26
- Figura 4 – Penzias e Wilson, em 1965, em frente às antenas nas quais foram detectadas a RCF. Fonte: <https://www.extremetech.com/extreme/210846-the-cosmic-microwave-background-was-accidentally-discovered-50-years-ago-and-it-changed-how-we-see-the-universe>, acessado em 09/08/2020. . . . 27
- Figura 5 – Mapas das flutuações na temperatura da RCF em diferentes regiões do céu medidas pelos satélites COBE, WMAP e PLANK. As colorações mais avermelhadas indicam um maior valor para a flutuação de temperatura e mais azuladas uma menor flutuação. Esses valores, assim como as funções utilizadas para ajustar a distribuição dessas flutuações ao longo do céu são hoje uma das principais informações sobre o Universo. A evolução da precisão das medidas podem ser notada para os diferentes satélites. [(BENNET, 2013), (BOGGES, 1992)(ADAM R.; ADE P.; AGHANIM, 2016)] Fonte: <https://archive.briankoberlein.com/2015/06/15/science-in-the-raw/index.html> 27

Figura 6 – Dinâmica da criação e consumo dos núcleos (isótopos) no Universo Primordial. Note a variação nas abundâncias dos diferentes elementos, durante a nucleossíntese, e sua estabilização após o término do processo. É possível observar também a abundância de 1H e 3He , frente à baixa presença dos demais elementos. Figura extraída e adaptada de (SCHNEIDER, 2015) 35

Figura 7 – Abundâncias dos elementos leves produzidos na Nucleossíntese Primordial, previsões teóricas e medidas observacionais [adaptado de (SCHNEIDER, 2015)] . As curvas coloridas indicam a previsão teórica para a abundância relativa ao Hidrogênio do 4_2He (verde), 2_2D (vermelho), 3_2He (ciano) e 7_3Li (azul), em função da densidade de energia dos bárions atual. As regiões destacadas por um retângulo, ou pelo par de setas, no caso do 3_2He , indicam os intervalos de valores medidos observáveis, e a faixa em azul claro o intervalo de valores para a densidade de bárions que melhor ajusta as abundâncias observadas para os 4 elementos. . . . 39

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores das abundâncias primordiais dos elementos leves (ROLFS C. E.; RODNEY, 1988). Observe a maior abundância de ${}^4_2\text{He}$ e a presença residual dos outros elementos. Confeccionado pelo autor.	35
---	----

Lista de abreviaturas e siglas

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TRG	Teoria da Relatividade Geraç
RCF	Radiação Cósmica de Fundo
FRWL	Friedmann-Robertson-Walker-Lemaitre

Lista de símbolos

p	próton
n	nêutron
e	elétron
d	deutério
e^+	pósitron
γ	fóton
ν_e	neutrino do elétron
$\bar{\nu}_e$	antineutrino do elétron
k	constante de Boltzmann
T	temperatura

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Considerações iniciais	21
1.2	Breve histórico	21
2	RELATIVIDADE GERAL E A NUCLEOSSÍNTESE	23
2.1	A relatividade geral e as equações de Friedmann	23
2.2	A Nucleossíntese e o desenvolvimento do Modelo Cosmológico Padrão	25
3	O UNIVERSO PRIMORDIAL E A NUCLEOSSÍNTESE	29
3.1	Etapas iniciais da evolução do Universo	29
3.2	Os primeiros instantes da história térmica do Universo	30
3.3	A nucleossíntese	32
4	AS ABUNDÂNCIAS DOS ELEMENTOS LEVES: PREVISÕES E OBSERVAÇÕES	37
4.1	Medidas observacionais e comparações	37
4.2	Nucleossíntese e nova Física	38
5	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	43

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

O termo "Nucleossíntese" é a denominação geral para a síntese ou combustão de elementos químicos em ambientes astrofísicos. A temperatura organiza a criação de núcleos atômicos e determina a sua evolução. Essencialmente, a nucleossíntese ocorre em dois ambientes: no Universo Primordial (poucos minutos após a criação do Universo) e nas estrelas.

Segundo a Teoria da Relatividade Geral, após 3 minutos do nascimento do Universo, a existência dos prótons (núcleos de Hidrogênio) permitiu a origem dos primeiros núcleos de Deutério, Trítio, Hélio e de Lítio (HORVATH G. J.; LUGONES, 2011). Essa fase é a denominada de Nucleossíntese Primordial. Para entendermos a origem do Universo e os processos presentes na sua evolução reunimos os conceitos básicos da Física Nuclear e da Cosmologia na visão da Relatividade Geral. Os processos para a formação dos primeiros elementos químicos estão associados no cenário do Universo em expansão, muito quente e preenchido por matéria e radiação em constante interação e competição. Esses processos termonucleares e as evidências empíricas sobre a origem do Universo fundamentam a teoria Cosmológica e suas consequências. Assim, buscamos, então, abordar o tema do ponto de vista da dinâmica nuclear envolvida na nucleossíntese primordial, destacando seus vínculos e como ela condiciona os parâmetros da abundância dos elementos químicos. Nessa abordagem, a Nucleossíntese Primordial, as evidências e questões observacionais relacionadas ao modelo Cosmológico Padrão contribuem para descobertas que possam alicerçar as ideias de uma Física nova.

1.2 Breve histórico

O início do século XX foi marcado por dois acontecimentos que transformaram nossa visão acerca do Universo, sendo um teórico e outro observacional envolvendo os físicos Albert Einstein e Edwin Hubble (ver Fig 1). Esses acontecimentos foram a Teoria da Relatividade Geral (TRG) e a constatação do afastamento das galáxias em relação à Via-Látea.

Em 1915, Einstein propõe a TRG com a previsão de um Universo em expansão (EINSTEIN, 1915), e em 1929, Hubble nos seus estudos sobre as nebulosas extragaláticas e o comportamento das diferentes galáxias observou o distanciamento das galáxias da Terra, concluindo que as galáxias são semelhantes à Via-Lactea e após muitas horas de observação

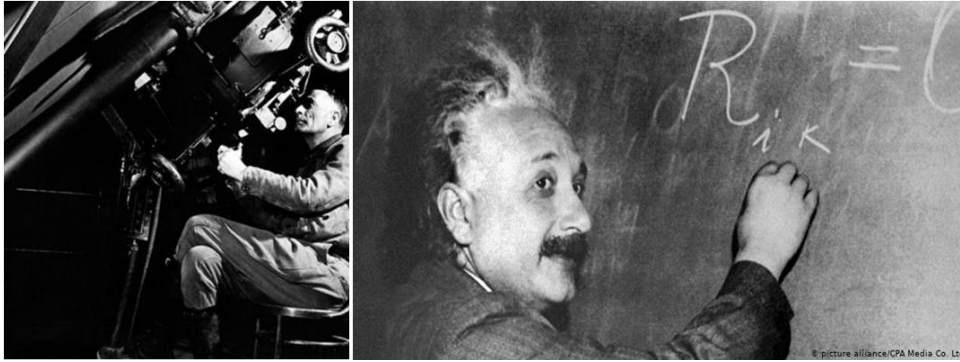


Figura 1 – Edwin Hubble observou (esquerda), em 1929, que as galáxias se afastam da Terra. Em 1915, Einstein (direita) apresentou a sua Teoria da Relatividade Geral, que revolucionou, junto com as posteriores observações de Hubble, a visão que temos do universo. Fontes: <https://www.npr.org/2011/11/10/142182292/credit-controversy-who-made-key-cosmos-discovery> (esquerda) e <https://www.bbc.com/portuguese/geral-44480196> (direita)

constatou que as galáxias estavam em constante distanciando da Terra, confirmando as previsão do Universo em expansão (HUBBLE E. ; M. L. HUMASON, 1931). Além disso, a partir das galáxias observadas, Hubble mostrou que a relação entre a velocidade de afastamento de cada galáxia e sua distância até a Terra era linear. Este comportamento ficou conhecido como a Lei de Hubble, escrita como $v = H_0 d$, onde v é a velocidade de afastamento de uma galáxia localizada a uma distância d da Terra, e H_0 é o parâmetro ou constante de Hubble. Esses fatos culminaram na formulação do modelo Cosmológico Padrão, que revolucionou a compreensão que temos hoje do Universo.

2 Relatividade Geral e a Nucleossíntese

2.1 A relatividade geral e as equações de Friedmann

Segundo a TRG, a interação gravitacional pode ser descrita a partir das deformações no espaço-tempo geradas por uma distribuição de matéria ou energia. Esse processo é expresso pelas equações de Einstein, Eq. 2.1, onde o lado esquerdo mostra o tensor de Einstein, diretamente relacionado com a métrica espaço-temporal, e, no lado direito, o tensor energia-momento, que expressa a distribuição do fluxo de energia e matéria satisfazendo a equação da continuidade (CLAYTON, 1988).

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (2.1)$$

Dentre as interações fundamentais na natureza, a força gravitacional é a dominante na escala cósmica. Assim, são as equações de Einstein que determinam, em larga escala, a dinâmica do Universo. Para resolvê-las, devemos levar em conta algumas condições de contorno e observações empíricas que impõem restrições à métrica envolvida, assim como propor um tensor de energia-momento que represente a distribuição de matéria e do fluxo de energia do Universo em larga escala. As condições de contorno é construída a partir do princípio cosmológico (em total acordo com as observações), ou seja, o Universo como sendo homogêneo (aproximadamente igual em todos os pontos e/ou regiões do universo) e isotrópico (o que implica em possuir o mesmo comportamento em todas as direções espaciais). A aplicação dessas condições ao tensor métrico resulta na chamada métrica de Friedmann-Robertson-Walker-Lemaitre, FRWL, cujo elemento de linha é dado por Eq.2.2:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right] \quad (2.2)$$

onde, t , r , θ e ϕ são as coordenadas consideradas (no sistema de coordenadas dito comóvel), ou seja, um parâmetro associado à medida de distâncias físicas no Universo e à dimensão de sua seção espacial e k é um parâmetro diretamente associado à curvatura do espaço-tempo (ver detalhes na Fig. 2). Quanto ao tensor energia-momento, o Universo pode ser aproximado por um fluido perfeito, que, sabemos hoje, possui três componentes: matéria, radiação e “Energia Escura” (DODELSON, 2002). Em 1925, no entanto, acreditava-se que o Universo era preenchido apenas por matéria e radiação. A homogeneidade e isotropia do espaço-tempo implica uma distribuição de energia igualmente homogênea e isotrópica, levando às componentes do tensor energia-momento (ver a Eq. 2.3 e Eq. 2.4 extraída de (DODELSON, 2002)):

$$T_0^0 = \rho \quad (2.3)$$

$$T_1^1 = T_2^2 = T_3^3 = -p \quad (2.4)$$

onde ρ e p significam, respectivamente, a densidade de energia e a pressão do fluido. Substituindo essas componentes e a métrica FRWL nas equações de Einstein teremos duas equações independentes, que são conhecidas como “Equações de Friedmann” e que estão escritas nas Eq. 2.5 e Eq. 2.6 (ver a Eq. 2.3 extraída de (DODELSON, 2002)):

$$H^2(t) = -\frac{kc^2}{a^2(t)} + \frac{8\pi G}{3c^2}\rho(t) \quad (2.5)$$

$$\frac{2\ddot{a}(t)}{a(t)} = -\frac{\dot{a}^2(t)}{a^2(t)} - \frac{kc^2}{a^2(t)} - \frac{8\pi Gp}{c^2} \quad (2.6)$$

onde $a(t)$ é o parâmetro de escala (sendo que, no presente, temos $a(t_0) = a(0)$), $\rho(t)$ é a densidade de energia do Universo, $H(t) = \dot{a}(t)/a(t)$, $\ddot{a}(t)$ e, respectivamente, a primeira e a segunda derivada do fator de escala com relação ao tempo t , G é a constante da gravitação universal, c é a velocidade da luz e k é o parâmetro de curvatura, que podem implicar em um universo plano, um universo com curvatura negativa, ou ainda, em um universo com curvatura positiva, conforme observamos na Fig 2 (DODELSON, 2002). Nela, vemos o caso de uma superfície $2d$ com diferentes curvaturas, que pode servir como analogia para o que ocorre em $3d$.

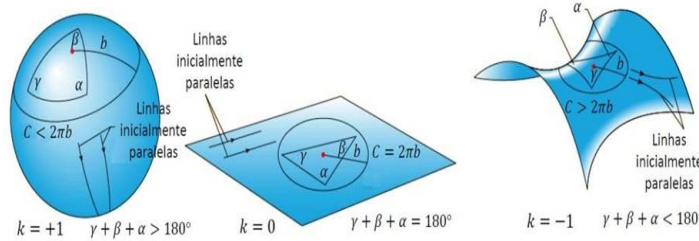


Figura 2 – Analogia em 2 dimensões do significado do parâmetro de curvatura k . No caso de $k = 1$, temos curvatura negativa, um Universo finito e curvo, no qual a soma dos ângulos internos de um triângulo é maior do que 180° . No caso $k = -1$ o espaço também é curvo, mas possui curvatura positiva e extensão infinita, sendo essa mesma soma menor que 180° . Para $k = 0$ temos um Universo plano e infinito, onde a soma dos ângulos internos de um triângulo vale 180° . Figura extraída de (NETO, 2018)

Destacamos que são as equações de Friedmann juntamente com a formulação tensorial da equação de conservação de energia, que determinam a dinâmica do Universo. O parâmetro $a(t)$ é o parâmetro fundamental para a descrição da dinâmica do espaço-tempo cosmológico denominado fator de escala. O fator de escala está diretamente associado à medida de distâncias físicas no Universo, e à eventual expansão ou contração da secção espacial do espaço-tempo. Assim, resolver as a Eqs. 2.5 e 2.6 significa, entre outros aspectos, obter uma expressão para $a(t)$. Fazendo isso, considerando os diferentes componentes

do Universo, obtemos a expressão para $a(t)$ dependente da curvatura do espaço-tempo. Tanto no caso do Universo plano como no de um Universo com curvatura negativa, a função obtida para $a(t)$ é crescente. No caso da curvatura positiva, obtém-se uma função inicialmente crescente e, a partir de um certo ponto, decrescente. O valor de k , por sua vez, será 1 se a densidade de energia do universo for menor que um certo valor crítico, 0 se for igual e -1 se for maior. Em todos esses casos, no entanto, temos, no passado do Universo, uma singularidade em $t = 0$, dada por $a = 0$. Foi esse resultado, obtido diretamente da TRG e corroborado, anos depois, pelas observações de Hubble, que levou à ideia, controversa na época, da existência de um início do Universo, ou seja, um momento no qual ele possui tamanho infinitamente pequeno, no qual toda a matéria e energia estava concentrada em dimensões muito pequenas [(DODELSON, 2002),(NETO, 2018)]. Assim, para além do aspecto dinâmico da expansão, o resultado obtido por Einstein apontava para um Universo completamente diferente do que se imaginava até então, Esse Universo teria a sua origem em condição muito densa e quente. Essas condições suscitou em novas questões, tais como, a de que forma ocorreu a sua evolução até hoje. As reflexões sobre essas questões esbarrou no processo de formação das partículas, dos diferentes elementos químicos, das estruturas das galáxias e, por fim, conduzem ao destino desse universo. Ao longo do século XX, essas questões foram sendo respondidas, na mesma medida em que novas foram surgindo, resultando no modelo Cosmológico Padrão.

2.2 A Nucleossíntese e o desenvolvimento do Modelo Cosmológico Padrão

Apesar da grande aceitação do modelo Cosmológico Padrão e a ocorrência do Big Bang, a ideia de que o Universo possuía um início foi motivo de muitas controvérsias na comunidade científica no começo do século XX. Dentre os cientistas, até mesmo o próprio Einstein, que se convenceu dos resultados indicados por suas equações apenas frente à medida da expansão realizada por Hubble. Um dos problemas imediatos a serem explicados pela Teoria do Big Bang recém proposta era a formação dos elementos químicos, e, em especial, de seus núcleos atômicos. Na época, sabia-se que a fusão dos núcleos dos elementos pesados se dava no interior das estrelas. Entretanto, a partir do instante inicial do universo, como os núcleos dos elementos leves teriam se formado? Os primeiros físicos que tentaram responder essa pergunta foram Ralph Alpher e George Gamow, que, juntamente com Hans Bethe (ver Fig. 3), em 1948 publicaram um artigo intitulado “A origem dos elementos químicos” (ALPHER R. R. A.; BETHE, 1948) no qual explicavam o processo de formação de núcleos de Deutério, Hélio, Trítio e Lítio a partir dos prótons e dos nêutrons. Como consequência disso, e das etapas de evolução de um universo muito denso e quente, previam a geração de uma radiação de fundo, que deveria ser detectada como tendo uma temperatura específica (atualmente de aproximadamente $3K$), de forma

homogênea e isotrópica. Esse trabalho não chamou atenção quando fora publicado, mas foi retomado, no início dos anos 60, por Robert Dicke e Yakov Zeldovich. Além disso, para além da observação de Hubble, não existiam, ainda nessa época, outras evidências observacionais do Big Bang.



Figura 3 – Alpher, Bethe e Gamow, responsáveis pela publicação, em 1948, do primeiro modelo de nucleossíntese primordial. Fonte: <http://diaryofnumbers.blogspot.com/2013/05/scientific-paper-of-week-alpher-bethe.html>.

Nesse contexto, para a validação do modelo do Big Bang e do modelo de nucleossíntese relacionando o universo primordial elaborado por Alpher e Gamow era determinante a detecção dessa radiação (ALPHER R R. A.; BETHE, 1948). Enquanto Dicke e Zeldovich estavam envolvidos no estudo da nucleossíntese proposta em 1948, os radioastrônomos Wilkinson e Roll tentavam detectar a radiação cósmica de fundo (RCF). No entanto, foram os engenheiros dos Laboratórios Bell, Arnold Penzias e Robert Wilson (ver Fig 4) que detectaram, por acidente, em 1965, uma radiação isotrópica e homogênea (SCHNEIDER, 2015), que mostrou possuir todas as características previstas por Alpher e Gamow e provou ser, de fato, a RCF. Esse resultado observacional é considerado um dos pilares irrefutáveis da Teoria do Big Bang e do modelo Cosmológico Padrão, sendo uma das principais fontes de informações cosmológicas sobre o Universo.

Desde 1964 até hoje, o conhecimento teórico e observacional sobre a RCF evoluiu significativamente. Desde os anos 90, alguns projetos propuseram mapear os fótons da RCF de diversas regiões do céu e, a partir de suas características de radiação de corpo negro, associá-los à temperatura dessa radiação. Os três mais importantes foram os satélites COBE, WMAP e PLANK, cujos resultados foram divulgados, respectivamente, em 1992, 2003 e 2013. A temperatura associada à RCF é obtida a partir do ajuste da curva de emissão de um corpo negro ao espectro da RCF de uma determinada direção do céu. Já as flutuações na temperatura são o resultado da temperatura medida subtraída a temperatura média ajustada ao sinal.

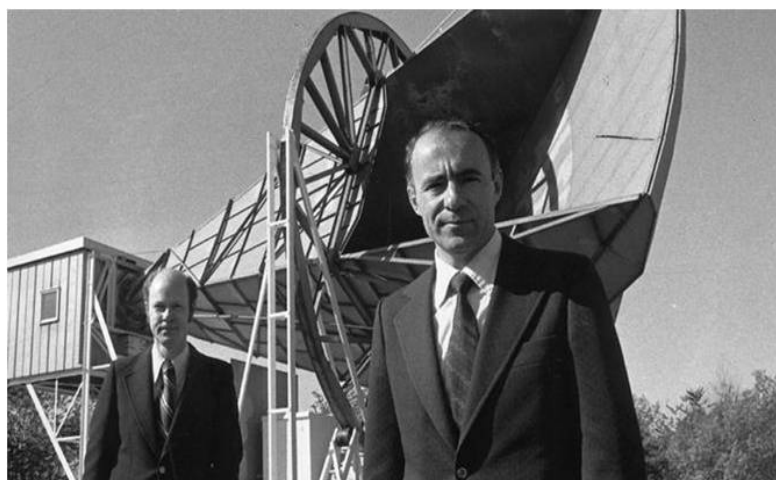


Figura 4 – Penzias e Wilson, em 1965, em frente às antenas nas quais foram detectadas a RCF. Fonte: <https://www.extremetech.com/extreme/210846-the-cosmic-microwave-background-was-accidentally-discovered-50-years-ago-and-it-changed-how-we-see-the-universe>, acessado em 09/08/2020.

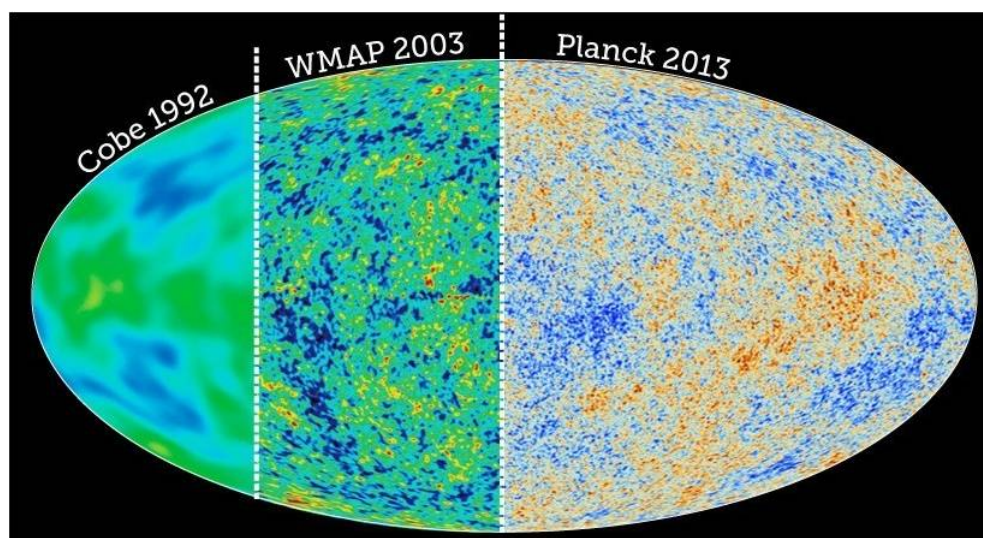


Figura 5 – Mapas das flutuações na temperatura da RCF em diferentes regiões do céu medidas pelos satélites COBE, WMAP e PLANK. As colorações mais avermelhadas indicam um maior valor para a flutuação de temperatura e mais azuladas uma menor flutuação. Esses valores, assim como as funções utilizadas para ajustar a distribuição dessas flutuações ao longo do céu são hoje uma das principais informações sobre o Universo. A evolução da precisão das medidas podem ser notada para os diferentes satélites. [(BENNET, 2013), (BOGGES, 1992)(ADAM R.; ADE P.; AGHANIM, 2016)] Fonte: <https://archive.briankoberlein.com/2015/06/15/science-in-the-raw/index.html>

3 O Universo Primordial e a Nucleossíntese

3.1 Etapas iniciais da evolução do Universo

A partir de um início quente e denso, a temperatura do Universo seguia decrescendo progressivamente, devido à sua expansão. Esse fato, implicava não só que a energia do gás de partículas formadas naquele momento reduzia com o tempo, mas que ela poderia ser usada como parâmetro para mapear a evolução do Cosmos. Por exemplo, o desacoplamento, fenômeno que veremos mais adiante, ocorreu em $3 \cdot 10^5$ ou, equivalentemente, em $T \sim 5000K$.

Além disso, conforme a expansão, as densidades de energia tanto na forma de matéria quanto na forma de radiação decrescem com o tempo. Considerando a equação de conservação de energia, que, devido à expansão cósmica, podemos mostrar que a densidade de energia na forma de matéria diminui com $a^3(t)$, enquanto que a densidade de energia da radiação diminui com $a^4(t)$ [(DODELSON, 2002),(PENZIAS A.; WILSON, 1999)]. Na primeiro caso, a densidade de energia na forma de matéria diminui inversamente proporcional ao volume, já no segundo, além disso, há o aumento do comprimento de onda de cada fóton, proporcional a $a(t)$, que ocorre por conta da expansão cósmica, e implica mais um fator de diminuição da densidade, levando à queda com $a^4(t)$.

O fato da densidade de energia em cada um dos componentes (matéria ou radiação) evoluírem de forma distinta com o parâmetro de escala, faz com que a dinâmica do Universo seja, em momentos diferentes, dominada por um dos componentes. Embora saibamos que o Universo atual é dominado por um componente a respeito do qual pouco sabemos, denominado Energia Escura, num passado cosmológico recente esse mesmo Universo tenha sido dominado por matéria e, em um passado mais distante, incluindo o momento no qual se deu a nucleossíntese, o domínio era da radiação [(DODELSON, 2002), (SCHNEIDER, 2015)]. Por fim, é importante destacar que a dinâmica entre fótons, prótons, elétrons e outras partículas ocorre no espaço-tempo em expansão, o que afeta diretamente a taxa de reação entre essas partículas, atuando no sentido de diminuí-la.

Ainda hoje, não sabemos o que ocorreu nos instantes iniciais do Universo. As razões apontam para a singularidade inicial, ou seja, a grande quantidade de energia e as pequenas dimensões envolvidas. Alguns cientistas acreditam que para explicar os instantes iniciais seria necessária uma nova teoria edificada a partir da gravidade quântica. Assim, o nosso conhecimento limita-se a $t \approx 10^{-44}s$ e em $T \approx 10^{32}K$ [(HORVATH G. J.; LUGONES, 2011),(SCHNEIDER, 2015)].

Para tornar as observações que possuímos sobre a homogeneidade da distribuição de matéria e da energia compatíveis com a teoria, é necessário que tenha havido um processo

de expansão fortemente acelerada, conhecida como inflação (DODELSON, 2002). Esse processo de inflação, também é pouco conhecido e não possui verificação observacional direta. A geração das partículas que conhecemos, e, em especial, a bariogênese ¹, teria ocorrido logo após o final da inflação, quando, estima-se, a temperatura do Universo seria de $T \sim 10^{28}K$. De modo geral, a diminuição da temperatura favorece a combinação das partículas elementares dando origem aos núcleos leves. Esses núcleos leves, valendo-se da disponibilidade de muitas partículas leves, numa sequência de reações termonucleares, geram novos núcleos cada vez mais pesados. Na primeira etapa, os produtos dessas reações são partículas leves (prótons, nêutrons, deutério, trítio, partículas alfas) e fótons (radiação gama) ². Outras estruturas são criadas conforme a escala de tempo aumenta e a temperatura diminui.

3.2 Os primeiros instantes da história térmica do Universo

Em $T > 10^{12}$, o Universo é composto por um plasma formado por quarks e antiquarks, glúons, neutrinos e antineutrinos, elétrons e pósitrons, múons, taus e antitauas, além de outras partículas exóticas ³. Quando a temperatura atinge $T \approx 10^{12}$, ocorre a hadronssíntese, na qual os quarks se unem formando prótons e nêutrons, de forma que, em $t \approx 1ms$ não há mais quarks livres. A partir desse instante, as únicas partículas que se mantêm nesse processo de criação e aniquilação são: os elétrons, os pósitrons, neutrinos e antineutrinos. Esse fato ocorre porque estas partículas possuem menor massa, e, portanto, precisam de fótons pouco energéticos para propiciar a formação de um par partícula-antipartícula. Com a queda da temperatura, também a energia dos fótons diminui, fazendo com que ela não seja mais suficiente para gerar pares prótons/antiprótons ou nêutrons/antinêutrons [(HORVATH G. J.; LUGONES, 2011),(ROLFS C. E.; RODNEY, 1988)]. Assim, a maioria dessas partículas é aniquilada, restando apenas alguns traços de nêutrons e prótons. Essa proporção é estimada em $N_b \approx 10^{-9}N_\gamma$, onde N_b e N_γ representam o número de bárions e de fótons, respectivamente. Essa temperatura ainda é suficiente, no entanto, para manter a matéria e a radiação em equilíbrio térmico, bem como o processo de geração e aniquilação de neutrinos/antineutrinos e elétrons/pósitrons. Além disso, prótons e nêutrons estão constantemente sendo transformados em nêutrons e prótons, respectivamente, por meio da troca de muons (mésons- π). As Eq. 3.1 e Eq. 3.2 conforme as reações envolvidas:



¹ Bariogênese é o processo de formação dos bárions.

² Os elementos químicos mais pesados são gerados em ambientes estelares. Esses processos acontecem na Nucleossíntese Estelar.

³ O material desta seção se baseia nas referências [(HORVATH G. J.; LUGONES, 2011), (ROLFS C. E.; RODNEY, 1988)]. Nesse ambiente, os fótons com energias suficientes participam da geração e aniquilação de pares de partículas/antipartículas.



O decaimento conhecido como nêutron livre, dado por $n \rightarrow p + \bar{\nu}_e$, não é relevante, devido à sua meia-vida curta, de 10,6 min. A relação entre a abundância de nêutrons e prótons é dada pelo fator de Boltzmann:

$$\frac{n}{p} \approx e^{-\frac{\Delta m c^2}{kT}} \quad (3.3)$$

onde, $\Delta m = m_n - m_p = 0.2310^{-29} kg$; n e p são os números de nêutrons e prótons, e m_n e m_p , a massa de nêutrons e prótons, respectivamente; T é a temperatura; e k é a constante de Boltzmann. Substituindo os valores para e e k , obtemos:

$$\frac{n}{p} \approx e^{-\frac{15,01}{T}} \quad (3.4)$$

A razão n/p é dependente da temperatura T que, como vimos, está em constante queda, de tal forma que quanto maior a temperatura, ou seja, para instantes mais próximos do Big Bang, as quantidades de prótons e nêutrons são praticamente as mesmas e, conforme diminui a temperatura, a quantidade de prótons aumenta em relação à quantidade de nêutrons. De fato, para $T = 10^{12} K$, temos $n/p \approx 1$. Acontece, no entanto, que esta reação nuclear não ocorre indefinidamente, mas seguindo suas taxas de reação ⁴, em ambos os sentidos da reação, afetadas pela queda da temperatura e pela expansão cósmica, além de outros efeitos ocorridos no ambiente astrofísico. Em torno de $T = 10^{11} K$, o desacoplamento dos neutrinos e antineutrinos passa a acontecer. No processo, essa temperatura é suficientemente baixa para cessar o processo de criação e aniquilação de partículas no plasma, ou seja, não há mais criação nem aniquilação de pares de neutrinos e antineutrinos. Desde então, essas partículas vagam pelo Universo. As suas energias são reduzidas devido ao aumento dos seus comprimentos de onda gerado pela expansão cósmica, sendo, por isso, denominadas “reliquias” [(HORVATH G. J.; LUGONES, 2011), (ROLFS C. E.; RODNEY, 1988)]. O seu comportamento é semelhante ao dos fótons da RCF descrito como o desacoplamento da matéria. No caso, os neutrinos e antineutrinos são observados, atualmente, com $T \approx 2K$, temperatura levemente menor que a da RCF. Isso ocorre, justamente porque ao desacoplar da matéria, ambas as partículas sofrem o redshift cosmológico ⁵. A consequência é a diminuição da energia à medida que o fator de escala aumenta. Por terem desacoplado anteriormente, os neutrinos sofrem esses efeitos há mais

⁴ A seção de choque, σ , de uma reação entre uma partícula incidente e um núcleo do alvo é a medida da probabilidade de ocorrência dessa reação. A taxa de reação é proporcional à seção de choque, à velocidade e fluxo de ambas as partículas envolvidas. As seções de choque são medidas na janela de Gamow que considera as densidades e à temperatura do Universo Primordial. O cálculo detalhado das seções de choque e taxas de reação envolvidas na nucleossíntese primordial pode ser visto em (ROLFS C. E.; RODNEY, 1988).

⁵ Devido a expansão do Universo, o comprimento de onda dos fótons que se propagam através dele aumenta com o tempo. A esse efeito, chamamos redshift cosmológico.

tempo, tendo, portanto, menor temperatura que os fótons [(HORVATH G. J.; LUGONES, 2011),(PENZIAS A.; WILSON, 1999)].

Em $T \approx 10^9 K$, a criação e aniquilação de elétrons e pósitrons decorre de um processo semelhante. Durante e logo após o desacoplamento, no entanto, há uma assimetria entre as taxas de criação e aniquilação de pares: enquanto os fótons não possuem mais energia para criar elétrons e pósitrons, a aniquilação desses pares continuam ocorrendo, gerando fótons. Esse processo cessa quando aproximadamente todos os pósitrons são consumidos, restando apenas um excesso de elétrons, cuja abundância, em função da abundância de fótons (γ), é dada por $N_e \approx 10^{-9} N_\gamma$ (HORVATH G. J.; LUGONES, 2011). Ainda em $T \approx 10^9 K$, o equilíbrio das reações Eq. 3.1 e Eq. 3.2 se desloca no sentido da transformação de nêutrons em prótons, devido a pequena diferença entre as suas massas.

Nesse instante, já na temperatura menor, torna-se mais provável a transformação do nêutron em próton do que o oposto (HORVATH G. J.; LUGONES, 2011). Esse processo ocorre até que cessam ambos os sentidos da conversão. À temperatura de $T \approx 7,5 \cdot 10^9 K$ (HORVATH G. J.; LUGONES, 2011), a proporção entre o número de prótons e de nêutrons resultante é dada então pelo valor obtido da Eq. 3.4. Neste caso, a abundância resultante é de 13% de nêutrons frente a 87% de prótons. É a partir desse momento, entre alguns segundos e 3 min após o Big Bang, que tem início a nucleossíntese no Universo Primordial. Além da estabilização do número de prótons e nêutrons, o início da Nucleossíntese Primordial está associado à disponibilidade de Deutério, D , a partir do qual são formados os núcleos dos elementos mais pesados. Embora já presente à essa temperatura, os núcleos de Deutério formados são fotodesintegrados rapidamente, devido à grande quantidade disponível de fótons com energia maior ou igual à energia de ligação desses núcleos, em comparação ao número de bárions. Isso impede não só a permanência desse elemento, mas dificulta a formação de elementos de maior energia de ligação como, por exemplo, a partícula-alfa. Esse processo será possível quando a energia dos fótons for menor do que a energia de ligação do Deutério. Isso ocorre por volta de $T = 10^{11} K$ (HORVATH G. J.; LUGONES, 2011), ou seja, um pouco depois da estabilização do número de prótons e de nêutrons. A queda da temperatura permite a formação de núcleos estáveis de Deutério, tendo início a Nucleossíntese.

3.3 A nucleossíntese

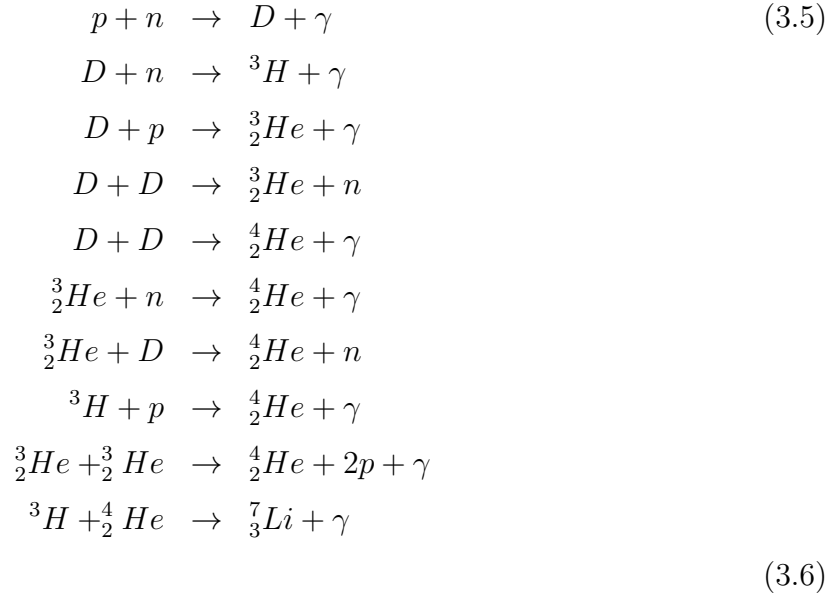
Na Física Nuclear, as reações envolvendo os núcleos leves são investigadas em termos dos mecanismos das reações e também são reproduzidas em laboratórios. O principal interesse é conhecer a probabilidade ocorrência de uma reação em detrimento a outras. Em estudos experimentais de Nucleossíntese espera-se determinar os caminhos mais prováveis para a ocorrência de uma reação nuclear explicando, assim, as razões para as abundâncias

e formação dos elementos químicos. As medidas experimentais, no que diz respeito à nucleossíntese, são guiadas pelos resultados obtidos por E. Gamow na dedução da taxa de reação, que pode ser vista em (ROLFS C. E.; RODNEY, 1988). Os resultados obtidos da Física Nuclear sobre a nucleossíntese associados às medidas observacionais podem servir para a validação dos modelos cosmológicos.

Na história do Universo, temos, já de partida, que a escassez de nêutrons, ou o excesso de prótons será determinante nesse processo. Isso significa que a presença de prótons (núcleos de Hidrogênio) é marcante e em grande quantidade nesse ambiente astrofísico. Precisamos ressaltar outro ponto importante nos mecanismos de formação dos elementos químicos: trata-se do problema da inexistência de núcleos de número de massa $A = 5$ e $A = 8$. Essa ausência impede, a princípio, a formação de núcleos mais pesados nesse ambiente astrofísico. Assim, outras reações e processos passam a ter importância na formação desses elementos. No que diz respeito ao Universo Primordial, a ausência dos núcleos de massa $A = 5$ e $A = 8$ está relacionada à probabilidade de ocorrer a fusão de dois núcleos de ${}^4_2\text{He}$ ou de um núcleo de ${}^4_2\text{He}$ com um próton [(HORVATH G. J.; LUGONES, 2011),(PENZIAS A.; WILSON, 1999),(ROLFS C. E.; RODNEY, 1988)]. A situação é ainda menos provável em relação a fusão de três núcleos. Já na ocasião da publicação do artigo de Alpher, Bethe e Gamow (ALPHER R. R. A.; BETHE, 1948), no entanto, eram conhecidos os processos de fusão responsáveis pela formação dos elementos mais pesados no interior das estrelas (PENZIAS A.; WILSON, 1999). Assim, considerando a abundância inicial de 13% de nêutrons, e que, em cada núcleo de ${}^4_2\text{He}$, os nêutrons respondem por apenas metade de sua massa, podemos inferir então uma abundância de 26% do ${}^4_2\text{He}$ com relação aos núcleos, resultando em uma abundância prevista de aproximadamente 26% de ${}^4_2\text{He}$, com 74% de abundância de núcleos de Hidrogênio, associados aos prótons que não se ligaram a nêutrons, devido ao seu excesso [(HORVATH G. J.; LUGONES, 2011),(ROLFS C. E.; RODNEY, 1988),(MATHEWS G.; KUSAKABE,)]. Os valores percentuais são relativos à massa total de núcleos.

Cálculos mais precisos, utilizando o conhecimento em Física Nuclear, e levando em conta a temperatura e taxa de expansão do Universo Primordial, assim como a quantidade inicial de prótons e nêutrons, permite então prever as abundâncias finais dos diferentes elementos. A maioria dos núcleos formados, considerando essas condições, é de ${}^4_2\text{He}$, pois trata-se do mais estável dos núcleos leves. Além disso, há quantidades residuais de ${}^3_2\text{He}$ e ${}^2_1\text{H}$ (Deutério, D) que, por conta da sua baixa densidade, da diminuição progressiva da temperatura e também da taxa de expansão, não foram consumidos na formação de ${}^4_2\text{He}$ [(HORVATH G. J.; LUGONES, 2011),(ROLFS C. E.; RODNEY, 1988)]. São previstas também pequenas quantidades dos núcleos de ${}^7_3\text{Li}$ e ${}^7_4\text{Be}$ [(HORVATH G. J.; LUGONES, 2011),(ROLFS C. E.; RODNEY, 1988)]. A seguir, mostramos as reações nucleares envolvidas na Nucleossíntese Primordial facilitando o entendimento da sequência em que elas ocorreram no cenário descrito até aqui [(PENZIAS A.; WILSON, 1999),(ROLFS

C. E.; RODNEY, 1988),(CLAYTON, 1988)].



Os valores das abundâncias, considerando tanto a massa quanto a densidade numérica (número de partículas/volume), relativos à densidade numérica de prótons, ou seja, de núcleos de Hidrogênio presentes, podem ser vistos na Tabela 1, à exceção do Berílio. Nessa tabela apresentamos os valores medidos, bem como a predominância de 1H e 4_2He , sendo a abundância dos outros elementos residual. Na Fig.7, as curvas previstas teoricamente podem definir a densidade de bárions do Universo.

Na Fig.6, podemos ver a dinâmica do consumo e da formação dos elementos leves na Nucleossíntese Primordial. Essa dinâmica pode ser obtidas a partir do cálculo da taxa de reação das diferentes reações envolvidas no processo (ROLFS C. E.; RODNEY, 1988). Note que, durante a nucleossíntese, os valores das massas de cada elemento, em comparação com a massa total, variam drasticamente. Já a quantidade de prótons varia relativamente pouco ao longo do processo. A abundância de prótons determina a quantidade de nêutrons livres, que diminui atingindo um valor estável e, no final do processo menor ainda. As abundâncias de outros elementos, por sua vez, aumentam gradativamente durante o processo. Em especial, as abundâncias de Lítio e Berílio aumentam tardiamente, pois são os elementos formados no processo final da Nucleossíntese Primordial.

Como visto, as previsões teóricas obtidas para a abundância dos diferentes núcleos dependem da densidade total de prótons, diretamente relacionada à densidade de bárions, presentes na nucleossíntese. Pelo fato da expansão do Universo se tratar de um processo adiabático, podemos obter essa densidade a partir da densidade presente nos dias de hoje. Deste modo, as abundâncias previstas teoricamente, supondo a ocorrência da Nucleossíntese Primordial, podem ser comparadas com aquelas que medimos no Universo atualmente. Utilizando esse procedimento podemos confirmar ou validar o modelo utilizado, incluindo tanto questões mais fundamentais, como a existência de um início quente e denso para o

Tabela 1 – Valores das abundâncias primordiais dos elementos leves (ROLFS C. E.; RODNEY, 1988). Observe a maior abundância de ${}^4_2\text{He}$ e a presença residual dos outros elementos. Confeccionado pelo autor.

Elementos leves	Densidade Numérica ($N_i/{}^1H$)	Fração em Massa (m_i/m_h)
1H	1,00	0,75
2D	$(1,6 \mp 1,0) \cdot 10^{-5}$	$(2,5 \mp 1,5) \cdot 10^{-5}$
3He	$(1,8 \mp 1,2) \cdot 10^{-5}$	$(4,2 \mp 2,8) \cdot 10^{-5}$
4He	$(7,5 \mp 0,9) \cdot 10^{-2}$	$0,23 \mp 0,02$
7Li	$(7 \mp 0,35) \cdot 10^{-11}$	$(3,0 \mp 1,5) \cdot 10^{-10}$
6Li	$(9 \mp 4,5) \cdot 10^{-10}$	$(4,6 \mp 2,3) \cdot 10^{-9}$

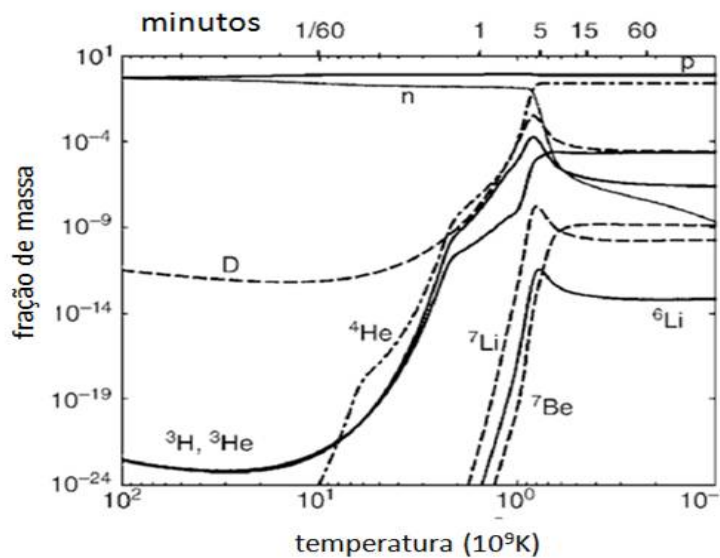


Figura 6 – Dinâmica da criação e consumo dos núcleos (isótopos) no Universo Primordial. Note a variação nas abundâncias dos diferentes elementos, durante a nucleossíntese, e sua estabilização após o término do processo. É possível observar também a abundância de 1H e 3He , frente à baixa presença dos demais elementos. Figura extraída e adaptada de (SCHNEIDER, 2015)

Universo, as condições de ocorrência da nucleossíntese primordial, bem como permitir que obtenhamos informações sobre o valor da densidade de bárions no Universo, ρ_b .

4 As Abundâncias dos Elementos Leves: Previsões e Observações

4.1 Medidas observacionais e comparações

A partir da Física Nuclear e das condições presentes no Universo Primordial, podemos prever a abundância dos elementos leves gerados pela nucleossíntese. Essas previsões, por sua vez, podem ser comparadas com os dados observacionais elucidando a evolução do Universo. Agora, veremos como é possível medir essas abundâncias no Universo atual, confrontar os valores obtidos com as previsões teóricas e analisar aspectos e informações decorrentes dessa comparação. Primeiramente, precisamos avaliar o quanto as abundâncias que medimos hoje são representativas daquelas que foram produzidas na nucleossíntese. Nesse sentido, Deutério e Lítio são especialmente importantes, pois não existe nenhum outro processo de criação desses núcleos na natureza. Isto significa que todos os átomos de Lítio e de Deutério existentes hoje foram formados na Nucleossíntese Primordial. No entanto, esses núcleos são consumidos no processo de formação de ${}^4_2\text{He}$ e ${}^3_2\text{He}$, ocorrido no interior das estrelas (HORVATH G. J.; LUGONES, 2011). Essa é a razão da impossibilidade de medi-las a partir de fontes terrestres, pois sabemos que o material que compõe a Terra já foi fortemente alterado pela nucleossíntese estelar e outros processos, como a explosão de supernovas, por exemplo. A confirmação destes eventos está justamente na presença dos elementos químicos pesados na natureza. Assim, é necessário o uso de fontes astrofísicas cuja composição seja a mais próxima possível da original, ou seja, que a contribuição da nucleossíntese estelar seja desprezível. A observação dessas fontes é realizada a partir da decomposição espectral da luz que recebemos delas, a partir da qual detectamos linhas de emissão, ou de absorção, que nos indicam a composição do material emissor ou absorvedor da luz.

Uma das fontes utilizadas são galáxias próximas, cuja luz chega até nós sofrendo pouca absorção de nuvens de gás, de poeira ou de outras distribuições de matéria, que possuam baixa metalicidade, ou seja, baixa concentração de elementos sintetizados nas estrelas. Isso indica que essa fonte está pouco “contaminada” por núcleos oriundos da fusão estelar, e garante que todo o ${}^4_2\text{He}$, ${}^3_2\text{He}$ e o Hidrogênio nela presente foram gerados pela Nucleossíntese Primordial. As medidas obtidas desse tipo de fonte indicam uma abundância de aproximadamente 24% de ${}^4_2\text{He}$, sendo, portanto, bastante compatível com o previsto pela teoria [(HORVATH G. J.; LUGONES, 2011), (ROLFS C. E.; RODNEY, 1988)]. Note que, embora as abundâncias dos elementos resultantes da nucleossíntese dependam de ρ_b , no caso do ${}^4_2\text{He}$ há uma pequena variação dentro de um grande intervalo de valores

para ρ_b , o que permite uma comparação entre previsão teórica e abundância observada independente dele. Essa compatibilidade, no entanto, deve ser confirmada pelas medidas de Lítio e Deutério.

Outro método é a medida da abundância desses elementos em nuvens de gás e de poeira que absorvem a luz de quasares distantes. Nesse caso, utilizamos quasares cujo espectro é bem conhecido, e verificamos as linhas de absorção no espectro. Essas linhas de absorção nos permitem inferir a composição do material absorvente. Esse método é especialmente importante para a aferição da abundância de Deutério, visto que, por ter baixa estabilidade e energia de ligação, pode ser facilmente consumido nas estrelas. Por fim, estrelas pobres em elementos pesados são utilizadas para aferir a abundância de Lítio. Isso é feito não a partir das linhas de emissão presentes na luz proveniente do núcleo da estrela, mas sim das linhas de absorção de sua fotosfera. Na Fig. 7, vemos as curvas para as abundâncias de ${}^4_2\text{He}$, ${}^3_2\text{He}$, ${}^2_1\text{D}$ e ${}^7_3\text{Li}$, sempre com relação à de Hidrogênio, em função de ρ_b , conjuntamente com os intervalos de medidas observacionais para elas, indicados pelos retângulos marcados e, no caso do ${}^3_2\text{He}$, pelo conjunto de setas.

No caso do ${}^4_2\text{He}$ e do ${}^2_1\text{D}$ notamos que há compatibilidade entre os valores medidos e a previsão teórica para um mesmo valor da densidade de bárions, não só indicando a validade do modelo mas nos dando uma estimativa desse valor. Já nos casos do ${}^3_2\text{He}$ e do ${}^7_3\text{Li}$, essa compatibilidade não ocorre dentro do intervalo esperado. Em especial, o ${}^7_3\text{Li}$, a abundância é razoavelmente maior. Esse resultado é conhecido como “problema do Lítio”. Conforme a bibliografia utilizada (HORVATH G. J.; LUGONES, 2011), essa discrepância pode ser gerada por erros sistemáticos ou indicar correções necessárias no modelo, ou mesmo a fronteira de uma Física nova. O comportamento crescente da curva obtida para o ${}^4_2\text{He}$, bem como o decrescente para a curva para o ${}^2_1\text{D}$ pode ser explicado a partir dos processos apresentados no capítulo anterior. Para valores maiores de ρ_b , a síntese do Deutério ocorre mais cedo e mais completa. Assim, permite o aumento da formação de núcleos de ${}^4_2\text{He}$, aumentando a quantidade de Deutério residual, que não fora transformado em Hélio.

4.2 Nucleossíntese e nova Física

Embora o processo de Nucleossíntese Primordial, assim como suas evidências empíricas, sendo as duas mais importantes a RCF e a abundância de elementos químicos leves, sejam bastante consolidados na Física, eles podem ainda fornecer informação sobre alguns problemas em aberto.

A questão é que a nucleossíntese envolve processos que dependem diretamente das partículas existentes e de outras características do Universo Primordial. Além disso, as altas energias nele envolvidas permitem a manifestação de fenômenos que só podem ser vistos,

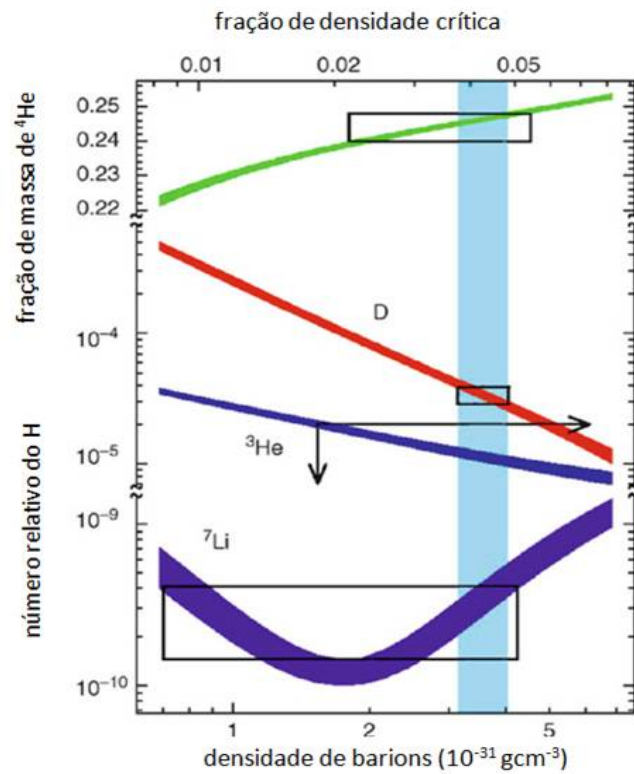


Figura 7 – Abundâncias dos elementos leves produzidos na Nucleossíntese Primordial, previsões teóricas e medidas observacionais [adaptado de (SCHNEIDER, 2015)]. As curvas coloridas indicam a previsão teórica para a abundância relativa ao Hidrogênio do ${}^4_2\text{He}$ (verde), ${}^2_2\text{D}$ (vermelho), ${}^3_2\text{He}$ (ciano) e ${}^7_3\text{Li}$ (azul), em função da densidade de energia dos bárions atual. As regiões destacadas por um retângulo, ou pelo par de setas, no caso do ${}^3_2\text{He}$, indicam os intervalos de valores medidos observáveis, e a faixa em azul claro o intervalo de valores para a densidade de bárions que melhor ajusta as abundâncias observadas para os 4 elementos.

atualmente, com a utilização dos grandes aceleradores de partículas. Exemplos desses problemas e fenômenos envolvem desde a Cosmologia, Gravitação, Física de Partículas e Física Nuclear de baixas energias [(HORVATH G. J.; LUGONES, 2011),(PENZIAS A.; WILSON, 1999)]. No que diz respeito à Cosmologia, podemos citar a obtenção de valores mais precisos para a constante de Hubble. Na Gravitação, uma possível variação da constante da Gravitação Universal, G ; as possíveis anisotropias na expansão cósmica e perturbações na distribuição de matéria e energia; as características do campo que gerou a inflação; e os diferentes tipos possíveis de matéria e energia escura. Na Física de Partículas: a identificação de novas partículas e o caso da possibilidade outros sabores de quarks; a existência de dimensões extras; entre outros. Na Física Nuclear de baixas energias, a identificação de ressonâncias importantes nas reações que acontecem no Universo Primordial e medidas experimentais empregando feixes radioativos podem contribuir para sua compreensão.

5 Conclusões

Neste trabalho, pudemos investigar e compreender como e em quais condições ocorreu o processo de formação dos núcleos dos elementos no Universo Primordial, e quais suas consequências observacionais. De uma forma geral, estudamos a origem e as características do Universo Primordial, assim como as variáveis determinantes desse ambiente. Além disso, foi possível compreender aspectos importantes do modelo Cosmológico Padrão, seu desenvolvimento inicial na primeira metade do século XX, e, em especial, o papel que a Nucleossíntese Primordial teve nesse processo, apontando para seu papel essencial na consolidação do modelo.

Apresentamos como o desenvolvimento da Relatividade Geral (EINSTEIN, 1915)] e as medidas realizadas por Hubble [(HUBBLE E. ; M. L. HUMASON, 1931) levaram ao surgimento do modelo Cosmológico Padrão e á ideia da ocorrência do Big Bang. Vimos que, a partir do princípio cosmológico, é possível escrever a métrica do Universo apresentado na Eq.2.3:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right] \quad (5.1)$$

Utilizando essa métrica e a Equação de Einstein, Eq.2.2, obtemos as equações de Friedmann apresentadas nas Eq.2.5 e Eq.2.6:

$$H^2(t) = -\frac{kc^2}{a^2(t)} + \frac{8\pi G}{3c^2} \rho(t) \quad (5.2)$$

$$\frac{2\ddot{a}(t)}{a(t)} = -\frac{\dot{a}^2(t)}{a^2(t)} - \frac{kc^2}{a^2(t)} - \frac{8\pi G p}{c^2} \quad (5.3)$$

A partir da resolução dessas equações, obtemos uma expressão para $a(t)$ que indica a existência de um momento no passado no qual todo o Universo possuiu dimensões muito pequenas, evento associado então à ocorrência do Big Bang. O conjunto das soluções das equações e da conservação de Tensor de energia-momento nos possibilitou demonstrar também que essas descobertas implicam em um início muito quente e denso para o Universo, instante no qual teria ocorrido a Nucleossíntese Primordial.

Esse processo ocorreu durante os primeiros $3min$ após Big Bang, e envolveu a ocorrência, em um ambiente com altas temperaturas e densidades, de uma sequência de reações nucleares, representadas pelas Eq. 3.4, que foram responsáveis por transformar nêutrons e prótons em núcleos leves de Hidrogênio, Hélio (3_2He e 4_2He), Deutério, Lítio e Berílio. Logo antes do início desse processo, cessam as reações representadas pelas equações 3.1 e Eq. 3.2:



$$p + e \leftrightarrow n + \bar{\nu}_e \quad (5.5)$$

Assim, a proporção entre nêutrons e prótons passa a ser constante, e assume valor que pode ser obtido através da Eq. 3.3:

$$\frac{n}{p} \approx e^{\frac{-\Delta mc^2}{kT}}. \quad (5.6)$$

Já a densidade de bárions permanece como um parâmetro livre. Esse parâmetro pode ser determinado justamente pelas medidas observacionais das abundâncias dos elementos formados pela Nucleossíntese Primordial. A partir dessas equações e sabendo que a temperatura do Universo Primordial está em constante diminuição, é possível calcular as seções de choque e taxas de reação associadas às reações nucleares ocorridas na Eq.3.4, conforme feito em (ROLFS C. E.; RODNEY, 1988). Ainda, podemos obter os valores e o comportamento das abundâncias para todos os elementos envolvidos no processo, mostradas na Fig 6, como também as abundâncias finais dos diferentes elementos formados, em função da densidade bariônica, como mostrado na Fig 7. Também nessa figura, podemos observar os valores dessas abundâncias medidos observacionalmente, o que permite obter estimativas para a densidade de bárions no Universo. A partir dessas medidas e de um estudo sobre as principais questões nelas envolvidas, é possível apontar problemas observacionais ainda existentes com relação às previsões do modelo como é o caso das abundâncias de Lítio observadas e investigar melhor o papel que a observação dessas abundâncias tem na determinação de parâmetros cosmológicos, por exemplo, na densidade de bárions.

Além disso, fizemos um breve levantamento das contribuições que o estudo da nucleossíntese e do efeito de diferentes grandezas físicas, características do Universo Primordial e das partículas elementares, assim como da geometria espaço-temporal sobre o seu resultado final pode fornecer, ainda hoje, para a investigação de Física nova, como a existência de dimensões extras [(HORVATH G. J.; LUGONES, 2011),(SCHNEIDER, 2015),(MATHEWS G.; KUSAKABE,)]. Esse tema impulsiona os novos projetos de pesquisa na construção de grandes aceleradores. A resolução de alguns problemas em aberto (Problema do Lítio, por exemplo) podem ter a contrinuição da Física Nuclear com desenvolvimento instrumental para medidas mais precisas de secção de choque em baixas energias e identificação de ressonâncias na região de Gamow [(ROLFS C. E.; RODNEY, 1988), (CLAYTON, 1988)].

Referências

- ADAM R.; ADE P.; AGHANIM, N. A. Y. e. a. Planck 2015 results: I. overview of products and scientific results. *Astronomy and Astrophysic*, USA, v. 594, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 27.
- ALPHER R R. A.; BETHE, H. G. G. The origin of chemical elements. *Phys Rev*, USA, v. 73, p. 803–804, 1948. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 33.
- BENNET, C. L. . e. a. Nine-year wilkinson microwave anisotropy probe (wmap) observations: Final maps and results. *The Astrophysical Journal Supplement Serie*, USA, v. 208, p. 208, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 27.
- BOGGES, N. W. a. The cobe mission - its design and performance two years after launch. *The Astrophysical Journal Supplement Serie*, USA, v. 397, p. 420, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 27.
- CLAYTON, D. D. *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*. Chicago: The University of Chicago Press, 1988. Citado 3 vezes nas páginas 23, 34 e 42.
- DODELSON, S. *Modern Cosmology*. Boston: Academic Press, 2002. Citado 5 vezes nas páginas 23, 24, 25, 29 e 30.
- EINSTEIN, A. Feldgleichungen der gravitation. *Preussische Akademie der Wissenschaften., Sitzungsberichte*, v. 1, n. Part 2, p. 844–847, 1915. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 41.
- HORVATH G. J.; LUGONES, G. e. a. *Cosmologia Física do Micro ao Macro Cosmos e Vice-versa*. São Paulo: Livraria da Física, 2011. Citado 10 vezes nas páginas 21, 29, 30, 31, 32, 33, 37, 38, 39 e 42.
- HUBBLE E. ; M. L. HUMASON, M. L. The velocity distance relation among extra-galactic nebulae. *Astrophys. J.*, USA, v. 80, n. 80, p. 43–80, 1931. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 41.
- MATHEWS G.; KUSAKABE, M. T. Introduction to big bang nucleosynthesis and modern cosmology. *International Journal of Modern Physics*, n. 08, p. 1741001. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 42.
- NETO, G. P. d. S. Estimando parâmetros cosmológicos a partir de dados observacionais. *Rev. Bras. Ensino Fís.*, São Paulo, v. 40, n. 2,e2318, p. 43–80, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 11, 24 e 25.
- PENZIAS A.; WILSON, R. Discovery of the cosmic microwave background. *Astrophysical J.*, USA, v. 525C, p. 1067, 1999. Citado 4 vezes nas páginas 29, 32, 33 e 39.
- ROLFS C. E.; RODNEY, W. S. *Cauldrons in the Cosmos. Nuclear astrophysics*. Chicago: The University of Chicago Press, 1988. Citado 8 vezes nas páginas 13, 30, 31, 33, 34, 35, 37 e 42.
- SCHNEIDER, P. *Extragalactic Astronomy and Cosmology*. New York: Springer-Verlag, 2015. Citado 6 vezes nas páginas 12, 26, 29, 35, 39 e 42.