

## Introdução:

Se imaginarmos o Universo presente de retrocedendo ao passado, podemos supor que, durante sua evolução antecipada, que era quente e denso o suficiente para que os elétrons, pósitrons, fótons e neutrinos, assim como núcleos mais pesado, estejam em equilíbrio cinético e químico, devido às altas taxas de interação (fraca, forte e eletromagnética).

Uma pergunta natural que surge é como, a partir deste plasma primordial, irão se formar os elementos como conhecemos. Para tentar responder esta pergunta é preciso entender como inicialmente se formam os núcleos leves, ou seja, entender os processos que ocorrem durante a nucleossíntese.

Um cenário é que à medida que o Universo se expande as partículas estão mais afastadas e por consequência a uma temperatura menor. No entanto, como consequência da expansão, os processos anteriores tornam-se fracos perante a taxa de expansão, algumas partículas têm velocidades diferentes e podem afastar-se do equilíbrio termodinâmico com o plasma restante.

Para compreender a taxa de expansão, se faz necessário entender os fundamentos Cosmologia Padrão, dentre eles a teoria da relatividade geral, além disto, para compreender as modificações no equilíbrio termodinâmico, é preciso ter em mente que na temperatura de cerca de 1 MeV a radiação prevalece sobre a matéria, possibilitando a síntese de elementos leves: <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>He, <sup>4</sup>He e <sup>7</sup>Li. Concomitantemente devemos levar em consideração aspectos quânticos, como a seção de choque, por isto utilizamos a equação de Boltzmann para relacionar diversos aspectos não triviais do plasma primordial.

Com as ferramentas citadas, podemos calcular a abundância de nêutrons que desempenham papel significativo na formação de largas estruturas, e estudar o período de Recombinação, que fornece parâmetros relacionados à radiação cósmica de fundo (CMB), que é observada atualmente.

## Resultados e Discussões:

O modelo cosmológico é baseado em observações astronômicas como a Lei de Hubble, o espectro da radiação proveniente dos fótons, que é praticamente semelhante à radiação de um corpo negro, e a homogeneidade e isotropia do Universo em grandes escalas. Além disto, o entendimento sobre a cosmologia padrão nos seu diversos conceitos sobre ajuda no comportamento do plasma primordial.

O modelo adotado para este estudo é a métrica Friedmann-Robertson-Walker (FRW) que possui característica de ser homogênea e isotrópica, escrita abaixo :

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

Nela, a(t) é o fator de escala e k = 1, 0, -1 é a escala espacial para curvaturas do tipo elípticas, euclidianas ou hiperbólicas, respectivamente.

A relação entre a curvatura do espaço-tempo e o conteúdo energético do universo é dada pela equação de Einstein:

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

Em altas temperaturas temos interações rápidas que garantem, até certo ponto, equilíbrio termodinâmico, e ainda mais, cada espécie de partícula é descrita pelo espaço de fase correspondente, assim sendo, podemos fazer uma estatística que relaciona a distribuição destas partículas no espaço de fase com relação às distribuições de Fermi-Dirac(+) ou Bose-Einstein(-), sendo  $\mu$  o potencial químico.

$$f_i(|p|, T) = \left[ \exp\left(\frac{E_i(|p|) - \mu_i}{T}\right) \pm 1 \right]^{-1}$$

No referencial comóvel, o número de densidade, a densidade de energia e pressão podem ser, respectivamente, escritos como:

$$n_i(T) = g_i \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} f_i(|p|, T)$$

$$\rho_i(T) = g_i \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} E_i(|p|) f_i(|p|, T)$$

$$P_i(T) = g_i \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \frac{|p|^2}{3E_i(|p|)} f_i(|p|, T)$$

Nas expressões acima  $g_i$  é o número de graus de liberdade. Como a nucleossíntese primordial acontece em um período em que existe domínio da radiação, então podemos negligenciar a contribuição das partículas não-relativísticas à densidade total de energia. Com esta aproximação, podemos escrever de modo conveniente o número total de graus de liberdade relativístico:  $g_* = \sum_{B_i} g_i \left(\frac{T_i}{T}\right)^4 + \frac{7}{8} \sum_{F_i} g_i \left(\frac{T_i}{T}\right)^4$  O primeiro termo se relaciona aos bósons e o segundo termo se relaciona aos férmions.

Em particular, a equação de Boltzmann desempenha um papel fundamental no formalismo de partículas que interagem, pois relaciona a taxa de variação da abundância de partículas com a taxa de produção/aniquiação para cada espécie. Na forma diferencial pode ser escrita como:  $\frac{df}{dt} = C[f]$

Estamos interessados nas seguintes reações que descrevem o bloco básico da formação dos elementos leves:



Utilizado as seguintes aproximações:

•Partículas relativísticas que estão em equilíbrio. Principalmente para elétrons, prótons e pósitrons, que interagem principalmente devido às forças eletromagnéticas;

•Partículas desacopladas, basicamente são neutrinos, que influenciam na interação com partículas acopladas;

•Partículas não-relativísticas, basicamente se tratam de bárions. Por uma questão de assimetria da quantidade inicial de bárions e anti-bárions, a diferença entre tais quantidades leva a um valor constante durante a expansão.

Com estas aproximações podemos calcular a razão prótons e nêutrons através de:  $\frac{n_p^{(0)}}{n_n^{(0)}} = \frac{e^{-m_p/T} \int d^3p p^2 e^{-m_p/T}}{e^{-m_n/T} \int d^3p p^2 e^{-m_n/T}}$  sendo conveniente definir a razão nêutrons por núcleo:  $X_n = \frac{n_n}{n_n + n_p}$ . Por fim obtemos a eq. diferencial de Boltzmann logo abaixo.

O Portanto, com o fato de que temos uma estimativa muito boa para a taxa de conversão de nêutrons para prótons ( $\lambda_{np}$ ), temos que a equação de Boltzmann na forma diferencial é:

$$\frac{dX_n}{dX} = \frac{x \lambda_{np}}{H(x=1)} \{e^{-x} - X_n(1 + e^{-x})\}.$$

Onde o fator de escala H (x=1) 1,13 sec<sup>-1</sup>.

Dessa forma, a partir da equação diferencial acima podemos obter o gráfico (vide abaixo) que mostra o comportamento da razão de nêutrons por núcleos pela diminuição da temperatura. À medida que a temperatura diminui e a taxa de interação dos neutrinos com a matéria acoplada aumenta, começa o período denominado Recombinação.

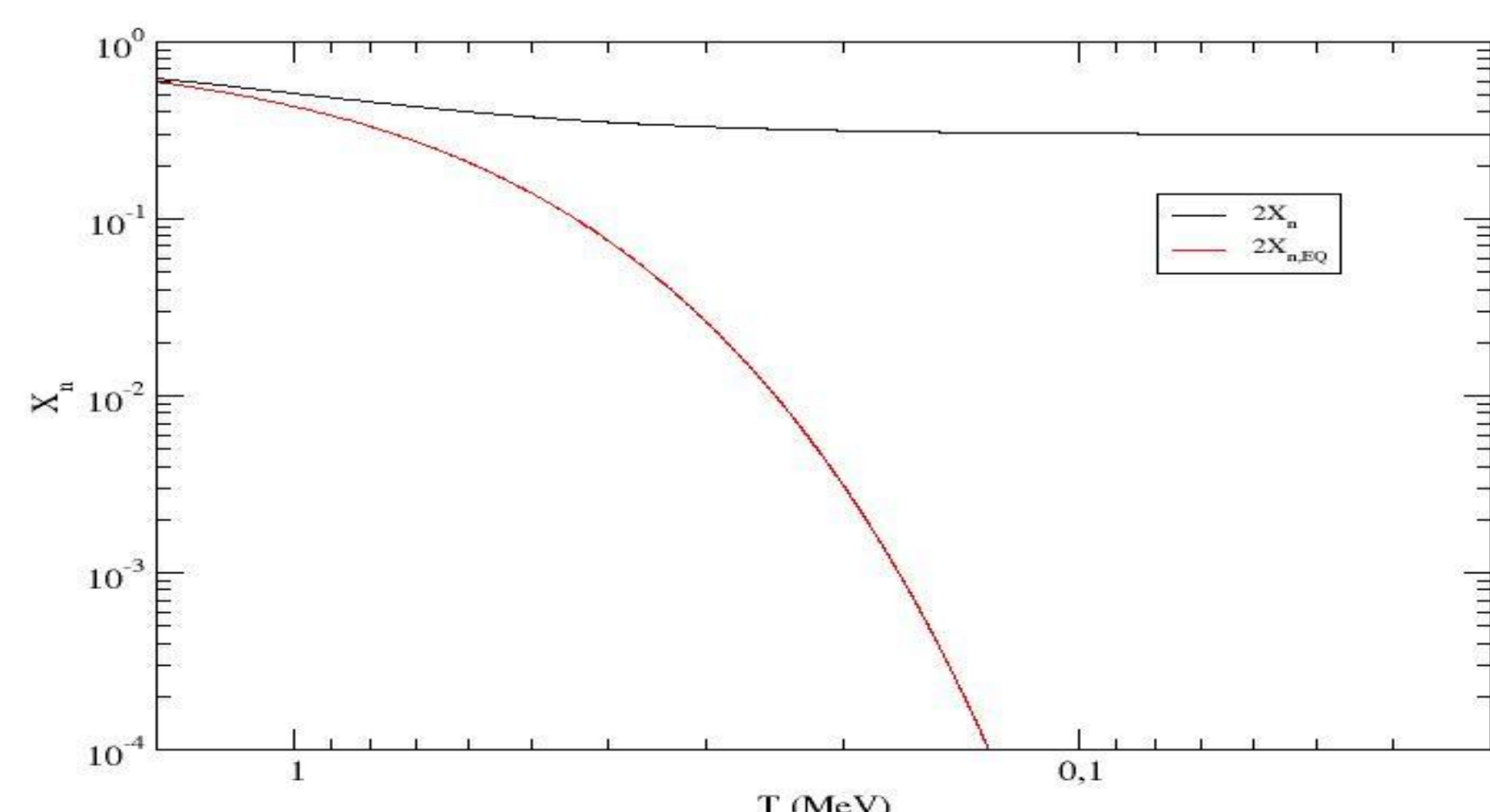


Figura 1 – decaimento da fração de nêutrons  $X_n$ .

## Conclusão

Para entender a física relacionada à criação dos elementos leves, a equação de Boltzmann mostrou-se muito confiável sendo compatível com os experimentos.

Como vimos, antes da recombinação, os fótons e os elétrons e prótons são fortemente acoplados um com o outro por causa de espalhamentos tipo Compton e coulombiano. Em seguida, os fótons podem circular livremente pelo universo sem interagir, de forma que os fótons remanescentes da CMB que nós observamos atualmente servem como parâmetro para futuros estudos.

A nucleossíntese e a recombinação são fortemente influenciados pelo fato de que as reações envolvidas, eventualmente, tornam-se demasiadamente lentas para acompanhar a taxa de expansão do Universo. Assim sendo, existem diversas questões relacionadas à influência da oscilação de neutrinos a serem respondidas.

## Agradecimentos



DRCC

## Referências

[1] Scott Dodelson, *Modern Cosmology*, Academic Press, 2003.

[2] John A. Peacock, *Cosmological Physics*, Cambridge University Press, 1999.