

A NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL E DENSIDADE DE MATÉRIA BARIÔNICA

Brenda Pinheiro Carneiro¹; Rainer Karl Madejsky²;

1. Bolsista PIBIC/CNPq, Graduanda em Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail:

brendapinheiroc@gmail.com

2. Orientador, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: madejsky@uefs.br

PALAVRAS-CHAVE: nucleossíntese primordial; modelo cosmológico padrão; matéria bariônica.

INTRODUÇÃO

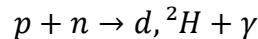
Durante o período primordial, o Universo foi dominado por radiação e sua densidade era inversamente proporcional ao fator de escala do universo (determinado pelas equações de Friedmann-Lemaître) elevado à quarta potência ($\rho \sim S^{-4}$). Quando o Universo tem uma idade de um segundo a temperatura, diminuindo atinge um valor adequado, sendo assim possível acontecerem às primeiras reações nucleares.

Quando a temperatura do Universo cai para $T \sim 10^9 K$ e sua energia (E) é aproximadamente $E \sim 1 MeV$ (Mega Elétron-Volt) as primeiras reações entre prótons (p) e nêutrons (n) começam a acontecer para poder formar o deutério (d), um isótopo do hidrogênio (H), que além de um próton tem também um nêutron.

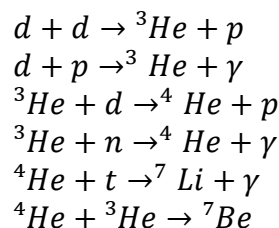
No início a razão entre prótons e nêutrons era de $\frac{1}{5}$, sendo um nêutron para cada cinco prótons, mas com a diminuição da temperatura, o número de reações aumentando e em função do decaimento beta (decaimento do nêutron) essa razão caiu de $\frac{1}{5}$ para $\frac{1}{7}$. Essa razão pode ser calculada através da equivalência de massa e energia.

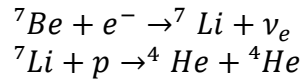
$$\frac{N_n}{N_p} = e^{-(\Delta m/kT)} \quad (1)$$

As principais reações que acontecem durante a nucleossíntese primordial produzem núcleos de deutério (d, ${}^2\text{H}$), trítio (${}^3\text{H}$), hélio-3 (${}^3\text{He}$), hélio-4 (${}^4\text{He}$), lítio-6 (${}^6\text{Li}$), lítio-7 (${}^7\text{Li}$) e berílio-7 (${}^7\text{Be}$), sendo o hélio-4 o mais estável de todos, com uma energia de ligação igual a aproximadamente 28,29 MeV, e sendo o lítio o menos produzido correspondendo apenas a uma fração de 10^{-9} g/cm^3 [3].



Assim que uma quantidade significativa de deutério foi produzida, outras reações nucleares puderam acontecer. A Era Nucleossintética é fundamentalmente determinada pelo valor da temperatura e da densidade em qualquer dos modelos de universo.





Os elementos mais pesados que o hélio-4 não são produzidos em quantidades significativas no Big Bang, com exceção de alguns isótopos do Lítio, Berílio e Boro. Com a diminuição da densidade e da temperatura esses núcleos mais pesados não são produzidos.

Estudando as reações nucleares entre prótons (p) e nêutrons (n), podemos determinar as taxas das reações em função da temperatura e densidade do Universo, comparando as abundâncias dos núclídeos do modelo teórico com os observadas e estudados, interpretando os resultados no contexto do Modelo Cosmológico Padrão (MCP).

MATERIAL E MÉTODOS OU METODOLOGIA

A metodologia utilizada durante todo ano de vigência da bolsa foi a consulta de literatura original, de livros e textos, além da análise dos métodos e conceitos físicos que são relevantes na discussão da nucleossíntese primordial, como por exemplo estudo sobre o corpo negro, a equação de Planck, estudos sobre termodinâmica, dos processos nucleares e analisando tudo a partir do Modelo Cosmológico Padrão.

Foram utilizados também métodos matemáticos analíticos e métodos gráficos que serão apresentados nos resultados, para analisar as densidades dos prótons e nêutrons, a densidade do universo e sua temperatura.

RESULTADOS E/OU DISCUSSÃO

Ao estudar a nucleossíntese percebemos que praticamente todos os nêutrons vão acabar formando núcleos de hélio [Figura 2], e após o nêutron começar a decair (após 889 segundos o nêutron decai para um elétron, um próton e um anti-neutrino), a razão

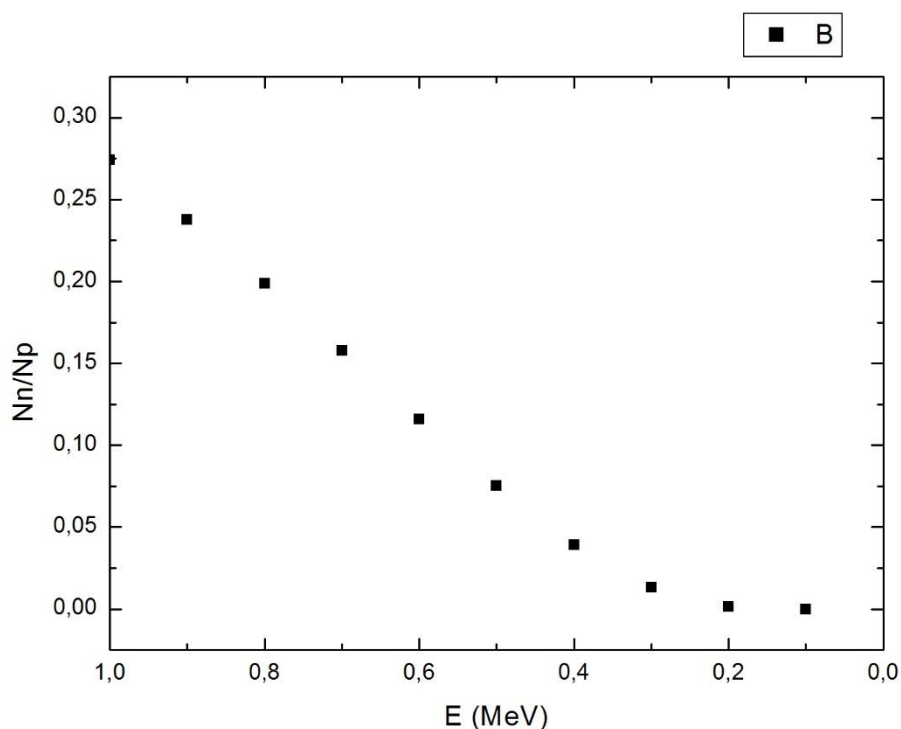


Figura 1 - Gráfico da razão entre prótons e nêutrons em função da energia, que diminui com o tempo.

entre prótons e nêutrons é de $\frac{1}{7}$.

A Figura 1 mostra o gráfico da razão entre prótons e nêutrons no período da nucleossíntese e em como a quantidade de nêutrons diminui com a diminuição da energia que é proporcional a temperatura.

Uma vez que ligado a um núcleo estável, o nêutron também se torna estável não participando assim do decaimento do nêutron. Os prótons que restam são futuros átomos de hidrogênio.

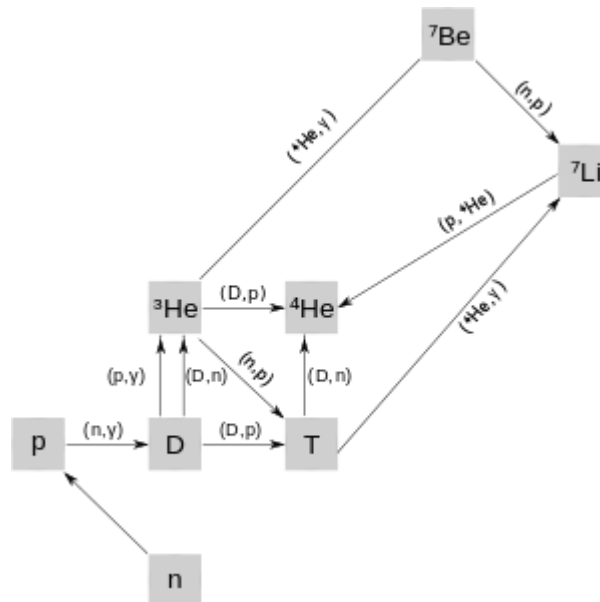


Figura 2 - Esquema mostrando as reações nucleares que acontecem no período da nucleossíntese.

A Figura 2 mostra as reações que acontecem no universo no período da nucleossíntese e os elementos que são formados. Indicando que o elemento dentro do quadrado colide com o próximo, dentro do parêntese, e o subproduto da reação ao lado.

A razão entre número de núcleos de hidrogênio e do número do núcleo de hélio-4 é de, $\frac{1}{12}$, e é dada por:

$$\frac{N_{He}}{N_H} = \frac{N_n/2}{N_n - N_p}$$

Todas essas reações vistas ao decorrer, são frutos de colisões entre os prótons e nêutrons e mais tarde entre os núcleos formados depois. Existe então uma probabilidade dessas colisões acontecerem e então os prótons, nêutrons e núcleos reagirem.

Essa probabilidade das colisões acontecerem, também conhecida com seção de choque, pode ser obtida através da equação,

$$Q = (\pi r^2). n. v. t$$

, sendo assim possível determinar o número de colisões entre prótons e nêutrons e depois entre os outros elementos já formados [1]. Depois de feito todos os cálculos, o valor de Q foi encontrado e seu valor é de $Q \cong 10^3$ para 1. Houve uma pequena fração do deutério que não formou ^4He e ficou intacto desde então quando a densidade foi baixa o suficiente para que ele não se combinasse totalmente. Esse deutério contém informações sobre a nucleossíntese e não existem outros processos de

formação/produção de deutério conhecidos e ele também não é formado nas estrelas. Logo, todo o deutério detectado foi produzido na nucleossíntese primordial, fazendo assim, do deutério um grande indicador dessa nucleossíntese.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo detalhado da nucleossíntese primordial- da síntese do hélio e do deutério- é um dos pilares do Modelo Cosmológico Padrão – FLRW. Essas produções são ótimos indicativos e conseguem explicar o MCP. Como não se é conhecido outros processos de produção de deutério, todo o deutério detectado nas galáxias foi produzido durante a nucleossíntese primordial, e esse deutério contém informações de como era o universo nesse período.

A quantidade de hélio produzida não é afetada pela atual densidade do universo, ou por ser o universo aberto ou fechado. Mas a abundância do deutério é muito sensível a essa densidade, um modelo aberto de universo (com a densidade baixa) produz uma grande quantidade de deutério, já em um modelo fechado de universo (com a densidade maior que 10^{-30} g/cm^3) produz muito pouco deutério.

A quantidade de deutério destruído pelas colisões num modelo aberto é reduzida portanto, a quantidade de deutério resultante num modelo aberto aumenta. Uma vez que muito pouco deutério sobrevive no modelo fechado, em relação ao aberto, concluímos que ou o universo é aberto ou ele não segue o modelo cosmológico padrão. O estudo desse isótopo é de extrema importância para podermos conhecer melhor as condições iniciais em que o universo se encontrava. A detecção de qualquer abundância de deutério é indicação que a nucleossíntese primordial o produziu.

REFERÊNCIAS

- [1] SILK, Joseph. O Big Bang: A origem do Universo. 2ª edição. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1988. 400 p.
- [2] MADEJSKY, K. Rainer. Curso básico de astrofísica e cosmologia: 1- O sistema solar, as estrelas e a Via Láctea. Feira de Santana: UEFS Editora, 2014. 360 p.
- [3] JONES, M.H., LAMBOURNE, R.J.A. Galaxies and Cosmology. Cambridge University Press, 2004.
- [4] CHUNG, K.C. Introdução à Física Nuclear. Rio de Janeiro: Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2011.
- [5] HORVATH, J., LUGONES, G. Cosmologia Física. 1ª edição. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2007.