

A NUCLEOSSÍNTESE ESTELAR E O TUNELAMENTO QUÂNTICO

Brenda Pinheiro Carneiro¹; Rainer Karl Madejsky²

1. Bolsista PIBIC/CNPq, Graduando 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: tunelamento quântico; cadeia p-p; evolução estelar

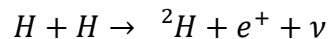
INTRODUÇÃO

200 milhões de anos depois do Big Bang as primeiras estrelas começam a serem formadas, dando início a uma outra fase da nucleossíntese, a nucleossíntese estelar. A maior parte dos elementos químicos que podemos observar é resultado de processos nucleares observados no interior das estrelas, onde a conversão de um elemento em outro é subproduto da geração de energia das estrelas.

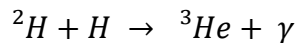
A nucleossíntese estelar é dividida em duas fases: a primeira acontece no equilíbrio hidrostático e é conhecida como nucleossíntese quiescente, onde as reações ocorrem durante toda a vida da estrela e a segunda fase que acontece fora do equilíbrio, conhecida como nucleossíntese explosiva e esta só ocorre no estágio final de estrelas muito massivas (MACIEL, 2004).

O processo mais simples que acontece na nucleossíntese estelar no equilíbrio hidrostático é a cadeia próton-próton (p-p), onde o hidrogênio (H) é queimado para formar hélio-4 (${}^4\text{He}$), gerando energia, pósitrons (e^+) e neutrinos (ν). Esta cadeia ocorre em estrelas com temperatura da ordem de aproximadamente $T \sim 10^7 \text{ K}$, e é um processo padrão em estrelas de baixa massa, como o nosso Sol, por exemplo, onde vem ocorrendo há mais ou menos 4 bilhões de anos, sendo responsáveis pela luminosidade solar.

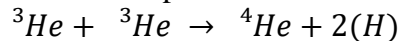
A maneira mais comum de queimar H na cadeia p-p é pela reação mostrada abaixo,



onde essa reação produz uma energia de cerca de $E \sim 0,16 \text{ MeV}$ e leva aproximadamente $t \sim 10^{10}$ anos para acontecer. Após isso o deutério (${}^2\text{H}$) produz um núcleo de hélio-3 (${}^3\text{He}$), liberando um fóton, como mostrado abaixo.



E finalmente, o núcleo de hélio-3 produz um núcleo de hélio-4.



A probabilidade desse núcleo de hélio-4 ser produzido numa estrela como o Sol é de 85%, e para que este seja produzido, é necessário que as duas reações anteriores aconteçam duas vezes (ARNETT, 1996; MACIEL, 1999).

Porém um núcleo composto por Z prótons cria uma barreira repulsiva conhecida como Potencial de Coulomb, que diminui com a distância r entre as partículas. Como no centro de uma estrela de $T \sim 10^7 \text{ K}$ não há nenhuma partícula com $E_c \cong 1 \text{ MeV}$, pela Mecânica Clássica não é permitida a nucleossíntese nas interiores das estrelas. Contudo, pela Mecânica Quântica, existe uma possibilidade de as reações acontecerem com o fenômeno conhecido como Tunelamento Quântico, sendo este essencial para a formação dos elementos químicos existentes no Universo (MADEJSKY, 2014).

METODOLOGIA

Consulta de literatura original e de livros texto. Foram analisados métodos e conceitos físicos relevantes na nucleossíntese, como por exemplo o efeito de tunelamento quântico. A abordagem foi feita com métodos da física nuclear para entender a cadeia p-p e o ciclo CNO. Além disso foram elaborados alguns gráficos, como o da probabilidade de tunelamento quântico e da distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann, para obtermos uma curva conhecida como Gamow Peak, utilizando o método de convolução. Todos os cálculos foram feitos de forma analítica, utilizando cálculo diferencial e integral e equações diferenciais, e os gráficos foram plotados pelo software gráfico Origin, versão 6.1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tunelamento é um fenômeno quântico no qual partículas podem penetrar uma barreira de potencial, nesse caso da Coulombiana, e então as reações nucleares se tornam possível. Portanto, existe uma probabilidade (P) associada a esse evento, que decai exponencialmente, à medida que a energia cinética da partícula diminui. Para obtermos a expressão da probabilidade de tunelamento quântico foi utilizada a Equação de Schrödinger, unidimensional e independente do tempo, já que o potencial coulombiano varia apenas com a distância r , porque ela nos permite estudar o comportamento da função de onda associada ao tunelamento.

$$H\Psi = E\Psi \quad (1)$$

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + V(r)\psi = E\psi \quad (2)$$

Após resolver a equação 2, com o potencial coulombiano inserido, obtemos a expressão para calcular a probabilidade (P), que é dada por

$$P = e^{-\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2\varepsilon_0 \hbar v}} \quad (3)$$

A partir da equação 4 podemos calcular a probabilidade quântica de que dois núcleos, com carga positiva, tunelem (MADEJSKY, 2014).

Para calcular as velocidades que estas partículas têm para colidir ou tunelar, utilizamos a distribuição Maxwelliana de velocidades, como dito anteriormente, porque as velocidades dessas partículas são representadas por essa distribuição. Esta distribuição é descrita como

$$dN = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{m}{2kT}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv \quad (4)$$

Após analisarmos as condições de tunelamento e as possíveis reações nucleares, o objetivo é obter uma Gamow Peak, multiplicando a probabilidade de tunelamento com a distribuição de Maxwell-Boltzmann. A Gamow Peak é a região de energia onde a maioria das reações acontecem e sua análise é importante no estudo das reações termonucleares, já que para energias mais altas, o número de partículas torna-se insignificante, enquanto para energias mais baixas o tunelamento através da barreira de Coulomb torna a reação improvável. O valor relativo de dN foi obtido integrando a seguinte expressão

$$\int_0^{0,1v_f} v^2 e^{-v^2} dv \quad (5)$$

para os intervalos médios de v_f . Os valores obtidos, tanto da probabilidade quanto de dN , estarão disponíveis nas tabelas 1, 2 e 3. Obtidos os valores de dN e de P , foi possível então plotar a curva Gamow Peak, figura 1, nos mostrando a região onde a maior parte

das reações acontecem em estrelas com temperaturas $T = 5 \times 10^6 K$, $T = 10 \times 10^6 K$ e $T = 15 \times 10^6 K$.

Tabela 1- $T = 5 \times 10^6 K$ e $v_f = 2,87 \times 10^5 \frac{m}{s}$

d_{v_f}	P_{v_f}	dN	$P_{v_f} \times dN$
2,6 - 2,7	1,38E-8	0,000630	8,68E-12
2,7 - 2,8	2,77E-8	0,000396	1,09E-11
2,8 - 2,9	5,06E-8	0,000243	1,23E-11
2,9 - 3,0	8,59E-8	0,001460	1,25E-11
3,0 - 3,1	1,52E-7	8,6E-5	1,31E-11
3,1 - 3,2	2,40E-7	4,9E-5	1,18E-11
3,2 - 3,3	3,74E-7	2,8E-5	1,05E-11
3,3 - 3,4	6,16E-7	1,5E-5	9,24E-12
3,4 - 3,5	9,19E-7	8,0E-6	7,35E-12

Tabela 2- $T = 10 \times 10^6 K$ e $v_f = 4,06 \times 10^5 \frac{m}{s}$

d_{v_f}	P_{v_f}	dN	$P_{v_f} \times dN$
2,3 - 2,4	6,16E-7	0,002200	1,35E-9
2,4 - 2,5	1,12E-6	0,001493	1,68E-9
2,5 - 2,6	1,85E-6	0,000982	1,82E-9
2,6 - 2,7	3,05E-6	0,000630	1,92E-9
2,7 - 2,8	5,03E-6	0,000396	1,99E-9
2,8 - 2,9	7,50E-6	0,000243	1,82E-9
2,9 - 3,0	1,12E-5	0,001460	1,63E-9
3,0 - 3,1	1,67E-5	8,6E-5	1,44E-9
3,1 - 3,2	2,25E-5	4,9E-5	1,10E-9

Tabela 3- $T = 15 \times 10^6 K$ e $v_f = 4,98 \times 10^5 \frac{m}{s}$

d_{v_f}	P_{v_f}	dN	$P_{v_f} \times dN$
2,1 - 2,2	2,26E-6	0,004560	1,03E-8
2,2 - 2,3	4,12E-6	0,003219	1,33E-8
2,3 - 2,4	6,79E-6	0,002200	1,49E-8
2,4 - 2,5	1,12E-5	0,001493	1,67E-8
2,5 - 2,6	1,85E-5	0,000982	1,81E-8
2,6 - 2,7	2,58E-5	0,000630	1,62E-8
2,7 - 2,8	3,72E-5	0,000396	1,47E-8
2,8 - 2,9	5,43E-5	0,000243	1,32E-8
2,9 - 3,0	7,56E-5	0,001460	1,10E-8

A partir dos dados obtidos nas tabelas acima, foi plotado o gráfico com as curvas abaixo, multiplicando os valores de dN e de P .

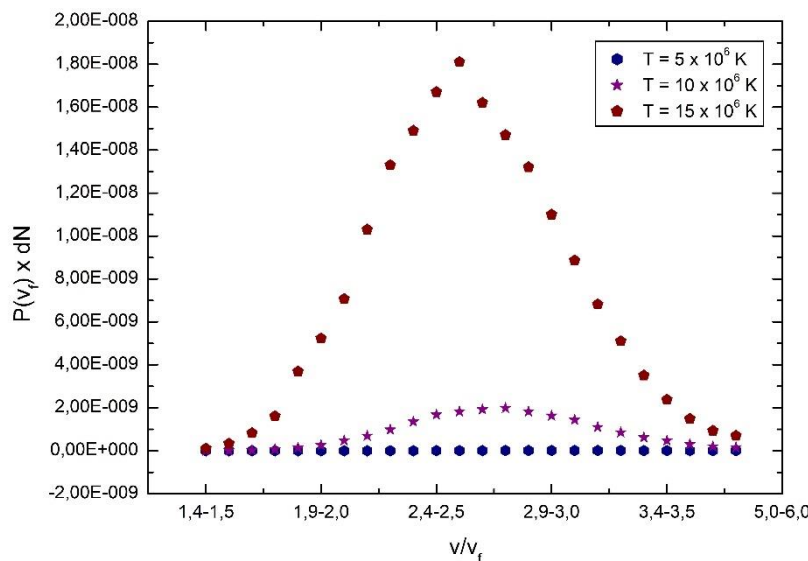


Figura 1- Gamow Peak obtida para três temperaturas distintas com os valores disponíveis nas Tabelas 1, 2 e 3.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os gráficos obtidos, podemos concluir que à medida que a temperatura aumenta, maior é a velocidade das partículas e, portanto, maior a probabilidade P . Porém essa probabilidade diminuiu muito rápido quando o produto $Z_1 Z_2$ aumenta, como mostra a equação (3), inibindo fortemente a síntese de núcleos pesados, exigindo temperaturas muito altas para a sínteses desses. Apesar da velocidade aumentar com T , não existem muitas partículas com velocidades muito altas A Gamow Peak, gráfico 1, resultado do produto (convolução) de P com dN , é a região onde existem prótons com energia suficiente para vencer a barreira de potencial, resultando em uma probabilidade maior que zero, e em grandes quantidades, dada pela distribuição de velocidades, por isso é de grande interesse conhecer essa região para podermos compreender melhor a evolução de estrelas desse tipo.

Estrelas como o nosso Sol implodem no momento em que elementos pesados, são sintetizados, tornando-se uma anã branca (fase final da evolução de estrelas). Já outras estrelas mais massivas que o Sol, continuam o processo de síntese através dos processos s e r , e durante o estágio final dessas estrelas seus núcleos são compostos basicamente por elementos pesados. Como foi percebido, o tunelamento quântico é essencial para a formação dos elementos químicos existentes no Universo e a taxa de produção de núcleos de estrelas depende fortemente da temperatura, pois quanto maior a produção de núcleos, menor será o tempo de vida da estrela.

REFERÊNCIAS

MACIEL, J. W., *Formação dos elementos químicos*. São Paulo: Revista USP, n. 62, p. 66-73, 2004.

ARNETT, D., *Supernovae and Nucleosynthesis: an investigation of the history of matter, from the big bang to the present*. Princeton University Press, 1996. 598p.

MACIEL, J. W., *Introdução à Estrutura e Evolução Estrelar*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999. 288 p.

MADEJSKY, K. R., *Curso básico de astrofísica e cosmologia: 1- O sistema solar, as estrelas e a Via Láctea*. Feira de Santana: UEFS Editora, 2014. 360 p.