

# A NUCLEOSSÍNTESE E O TUNELAMENTO DE UMA BARREIRA DE POTENCIAL

**Jadiane de Jesus Santana<sup>1</sup>; Rainer Karl Madejsky**<sup>2</sup>

1. Bolsista PIBIC/ CNPq, Graduanda em Matemática, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: [jadianesantana.mat@hotmail.com](mailto:jadianesantana.mat@hotmail.com)

2. Orientador: Rainer Karl Madejsky, Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: [madejsky@uefs.br](mailto:madejsky@uefs.br)

**PALAVRAS CHAVES:** Reação nuclear, Nucleossíntese, Tunelamento

## INTRODUÇÃO

Este trabalho de Iniciação Científica visa estudar o processo da síntese dos núcleos atômicos, bem como explicar esse processo; o fenômeno de tunelamento; aplicando a equação de Schroedinger, estudando os casos: quando a energia cinética for igual ao potencial, quando a energia cinética for maior que o potencial, e principalmente, quando a energia for menor que o potencial. O que segundo a Física clássica não poderia ocorrer, mas, é necessário que aconteça para que haja a nucleossíntese, pois sem esse processo, tunelamento, uma estrela não teria energia para gastar e existir por tantos anos, caso não ocorresse esse processo a energia seria gasta em fração de minutos, e em alguns casos, segundos, e assim, já não existiriam mais. Para um maior esclarecimento do assunto que será discutido ao longo desse trabalho, o leitor poderá recorrer aos livros: Físico – Química, Física Quântica, Um curso de Física Básica Vol.IV e outros de Física, envolvendo quântica.

O processo de produção de energia no interior de uma estrela sempre inquietou o homem. “O que são as estrelas”? “O que é que as fazem brilhar tanto”? “A energia que as mantêm, farão existir para sempre”? São questionamentos pertinentes. Mas, somente com o avanço da mecânica quântica foi possível estudar a produção de energia, que é a nucleossíntese, possibilitando respostas cientificamente.

As estrelas são formadas a partir de uma nuvem de gás e poeira interestelar. Através do colapso gravitacional, a protoestrela, fragmento da nuvem de poeira, colapsa em queda livre aumentando a temperatura e a pressão térmica até que o aumento da temperatura torne-se desprezível, então a estrela entra na escala de pré-sequência principal, no qual é estabelecido um equilíbrio hidrostático. A sequência principal consiste na fase de equilíbrio de uma estrela, esta estabilidade é garantida por meio de duas forças, pois no núcleo ocorre a fusão nuclear e a síntese de elementos químicos e isso gera uma pressão muito grande de dentro para fora, por conseguinte, tem-se a força gravitacional que atua de fora para dentro, permitindo assim um equilíbrio entre pressão térmica e gravitacional. No momento que a região central da estrela está suficientemente quente, dá-se início à reação nuclear, que é o processo de fusão nuclear. Sendo este processo responsável por promover a energia necessária para a estrela se manter ao longo dos anos, o que será discutido mais à frente.

## MATERIAL, MÉTODOS

Consultas de literatura original, de livros e textos referentes ao assunto, fazendo análise dos métodos e conceitos físicos sobre o conteúdo: formação e evolução das estrelas e das galáxias, sobre as diferentes fases da nucleossíntese do universo, processos nucleares como a cadeia próton-próton, o ciclo CNO, e o processo triplo-alfa.

Resolução de cálculos com métodos matemáticos analíticos, sendo complementado com métodos gráficos (da distribuição de partículas) e numéricos. Métodos numéricos:

resolução da (EDP) equações diferenciais parciais, integração numérica. Métodos analíticos: cálculo diferencial, cálculo integral, solução de uma equação diferencial, análise da distribuição Maxwelliana de velocidades, análise do número de núcleos para diferentes energias, aplicação da equação de Schroedinger para determinar a probabilidade quântica do tunelamento, e resolução da mesma.

## DISCUSSÃO

Existem quatro interações fundamentais que regem o Universo que são: a força fraca, de curto alcance, a força forte, atua entre os bárions, é responsável pela estabilidade dos núcleos atômicos, é de curto alcance, dentre as quatro ela é a que apresenta maior intensidade, e é de se esperar, pois é ela que garante a estabilidade dos núcleos atômicos contra a força eletrostática repulsiva entre os prótons; e as forças, eletromagnética e gravitacional, ambas são de longo alcance e diminuem de forma proporcional ao quadrado da distância. Mas, a discussão será mantida apenas à força nuclear forte, pois a reação consiste nos núcleos atômicos.

Existe uma força repulsiva entre os prótons a medida que eles se aproximam, sendo assim, quando dois núcleos com  $Z_1$  e  $Z_2$  prótons se encontram à uma certa distância  $r$  é gerado uma força eletrostática repulsiva, correspondendo a uma energia potencial, o potencial de Coulomb,  $Vr = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi \epsilon_0 r}$ , assim, uma reação nuclear acontece quando há uma interação entre os núcleos a medida que estes se aproximam indo de contra a essa força repulsiva até uma distância de alcance da força nuclear forte, que é  $R = 2,10^{-15}m$ .

Segundo a Física Clássica, para ocorrer uma reação nuclear a energia cinética dos núcleos  $Ec$  tem que ser maior ou igual à energia potencial dos núcleos durante a aproximação, requerendo temperaturas em torno de 10 bilhões  $K$ . Onde a certa distância  $R$ , a energia potencial de dois prótons é  $Ep = 0,7MeV$ , porém, no interior de uma estrela a uma temperatura  $Tc \approx 10^7K$  a energia cinética é menor do que  $Ep$ , equivalendo a  $1,3 MeV$ . Em base na fundamentação teórica Clássica, fica claro que estaria impossibilitado a reação ocorrer. Porém, por meio da Física Quântica, existem explicações para que a reação aconteça a partir do mecanismo: tunelamento de uma barreira de potencial.

Utilizando a distribuição Maxwelliana para distribuição das velocidades, pois as velocidades dos prótons e demais núcleos nas regiões centrais das estrelas seguem essa distribuição,  $dN(v) = f(v) dv \sim v^2 e^{-\frac{mv^2}{2KT}} dv$ , onde  $dN$  corresponde ao número de partículas cujas velocidades estão compreendidas no intervalo. Como se trata de um fator exponencial, é possível perceber que o número  $dN$  de partícula tenderá diminuir nesses intervalos, Através da distribuição Maxwelliana é possível encontrar  $v_f = \sqrt{\frac{2KT}{m}}$  (o máximo no gráfico), sempre existirá partículas com velocidades acima de  $v_f$ , mas como o número cai exponencialmente para velocidades altas, não haverá nenhuma partícula com energia cinética necessária para que ocorra a reação, assim, ficaria impossibilitado ocorrer a nucleossíntese. É então que inicia o processo que permite a execução desse evento, o tunelamento.

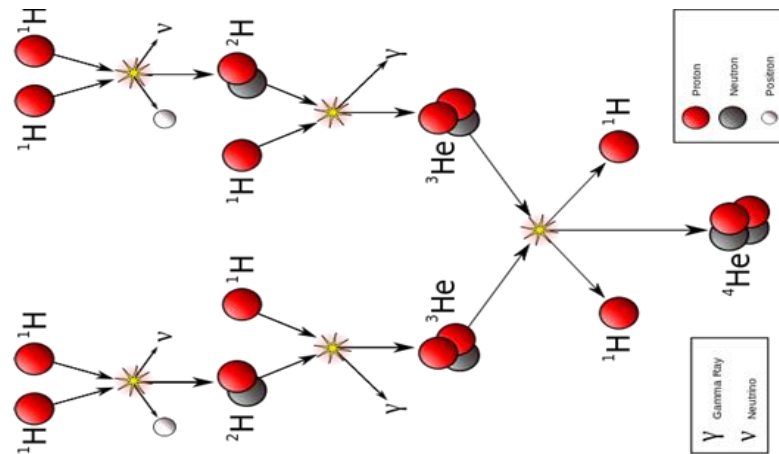
### A Nucleossíntese Estelar

Quando a região central da protoestrela fica quente o suficiente dá início os processos de fusão nuclear, gerando então, energia necessária para uma estrela se sustentar. O processo de fusão envolve quatro núcleos de hidrogênio que se fundem para formar um núcleo de hélio. Nesse processo existe uma diferença de 0,007 na massa produzida, em relação as quatro

massas individualmente dos hidrogênios, e essa diferença é convertida em energia no centro da estrela. E como uma estrela da sequência principal tem cerca de 90% de hidrogênio, isso significa que ela terá muito o que “queimar”. As cadeias que explicam esse processo são: cadeia próton-próton (*PP*), ciclo do carbono (*CNO*), e a triplo alfa. A queima do hidrogênio é fundamental para o processo de evolução da estrela.

### Cadeia *PP*

Esta cadeia domina em temperaturas e massas menores, estrelas compostas basicamente de hidrogênio *H*. O processo consiste em: dois átomos de hidrogênio se fundem gerando um núcleo de deutério, um pósitron e um neutrino. O neutrino imediatamente escapa da estrela, e o pósitron ao colidir com um elétron libera energia. Logo após, o núcleo de deutério se choca com outro átomo de hidrogênio, formando um isótopo do hélio e liberando energia na forma de fóton  $\gamma$ . E para finalizar, dois desses isótopos se fundem formando um átomo de hélio  $He^4$  e dois núcleos de hidrogênio, novos candidatos para “continuação” do ciclo.



**Figura 1:** Formação do núcleo de hélio, cadeia *PP*.  $\nu$  – Neutrino;  $\gamma$  – Energia; Bola branca – Pósitron; Bola vermelha – Próton

### Ciclo do carbono *CNO*

Inicia com a fusão de um núcleo de hidrogênio com o núcleo do carbono, ao final, serão utilizados quatro núcleos de hidrogênio que formarão um núcleo de hélio e um de carbono, e assim, permite também a continuação do ciclo.

Na proporção que essas etapas vão ocorrendo, no centro da estrela vai se concentrando grande quantidade de hélio que não poderão, de início, serem queimados, devido à baixa temperatura. E só ocorrerá com o processo a seguir.

### Triplo alfa

Ocorre para temperaturas altas, acima de  $10^8\text{K}$ . Quando tem uma quantidade significativa de hélio, e o hidrogênio já é insuficiente para queimar, a estrela colapsa aumentando sua temperatura interna, atingindo a temperatura necessária para que ocorra esse processo. E assim têm-se no final, três núcleos de hélio produzindo um núcleo de carbono, como esse processo requer elevadas temperaturas, ele só ocorre no centro. Todo esse processo consiste na fase de gigante vermelha, fases finais, onde a estrela sai da sequência principal.

### O TUNELAMENTO

O tunelamento consiste no processo da partícula atravessar a barreira, causada pela força eletrostática de “Coulomb”, a repulsão de partículas de cargas iguais, no caso, os prótons dos núcleos atômicos. Pois quando duas partícula com  $Z_1$  e  $Z_2$  (número de prótons) se aproximam, cria-se uma barreira repulsiva e para vencê-la, nas condições particulares das regiões centrais, tem que haver o tunelamento.

Para determinar o movimento da partícula tem que encontrar a função da onda para o caso onde o potencial é maior que a energia cinética, encontrado a partir da equação de Schroedinger:  $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{2m}{\hbar^2} (V - E)\psi$  e por meio de integrais encontra-se a probabilidade quântica de tunelamento; encontra a solução da EDP, necessária para determinar a probabilidade quântica  $P$ ; a densidade de probabilidade de se encontrar a partícula entre os intervalos  $x$  e  $x+dx$  que é:  $|\psi|^2 = |\psi|^2 e^{-2\lambda x}$ ; calculando também o logaritmo da probabilidade através da integral  $\ln P$ , assim, a probabilidade quântica de tunelamento de uma barreira de potencial de energia  $E < V$ , energia cinética da partícula menor que o potencial (a problemática) será:  $P = e^{-(Z_1 Z_2 e^2 / 2\epsilon_0 \hbar v)}$ , a qual diminui rapidamente quando  $Z_1$  e  $Z_2$  aumentam. É possível fazer uma comparação entre a teoria de Schroedinger e a teoria de Maxwell para o eletromagnetismo, pois as ondas eletromagnéticas se comportam de forma similar ao comportamento das funções da onda da teoria de Schroedinger.

## CONCLUSÃO

É verificado a grande importância da Física Quântica, pois se não houvesse o fenômeno do tunelamento quântico não poderia ocorrer a síntese dos núcleos nas regiões centrais das estrelas e estaria “limitado” o conhecimento deste incrível processo. É possível analisar a equação de Schroedinger, que é uma equação básica para descrever o tunelamento quântico, com a análise da distribuição de energia dos núcleos atômicos chegando a probabilidade quântica do tunelamento de uma barreira de potencial, onde, quanto mais alta for a barreira mais difícil torna-se para a partícula vencê-la. Através do estudo das reações nucleares, tais como, a cadeia próton-próton, ciclo CNO e o processo triplo alfa, é possível descrever a reação nuclear, a nucleossíntese. E mais uma vez, fica evidenciado a grande contribuição da física quântica para a explicação do processo de energia através da queima dos núcleos, nas regiões centrais.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

EISBERG, Robert e ROBERT, Resnick. 1979. *Física Quântica*. Rio de Janeiro, Elsevier.

NUSSENZVEIG, H Moysés. 1998. *Curso de Física Básica*. São Paulo, Edgard Blucher.

MOORE, Walter Jhon. *Físico-Química*. 4ª ed. São Paulo, Edgard Blucher, Cap.: 13.

YONG, Hugh D. e FREEDMAN, Roger A. 2008. *Física II. Termodinâmica e Ondas*. Vol. II, São Paulo, Addison Wesley. Cap.: 18.

SERWAY, Raymond A. e JUNIOR. Jhon W. Jewett. 2006. *Princípios de Física: Movimento Ondulatório e Termodinâmica*. Vol. II. São Paulo: Thomson Learning Edições.

ANTON, Howard. BIVENS, Irl. DAVIS, Stehen. Cálculo. Vol. II, 6ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2000. Cap.: 4 “Coordenadas Cilíndricas e Esféricas” p. 241.

Notas de aula. Caderno de Física- UEFS.