

## BUSCA POR REAÇÕES NUCLEARES COM IMPLICAÇÕES NO MODELO BIG-BANG NÃO-HOMOGÊNEO

*R. de S. Dias<sup>1</sup>, M. Assunção<sup>1n</sup>*

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema/Departamento de Ciências Exatas e da Terra, R. Prof. Artur Riedel, 275 CEP 09972-270, rafael\_29@hotmail.com

**Resumo-** Este trabalho consiste na determinação das condições experimentais necessárias para a medida de reações nucleares com implicações no modelo do Big-Bang não-homogêneo. O objetivo geral é a verificação da viabilidade de medida de algumas reações empregando aceleradores. O estudo estará centrado na escolha da reação, nos cálculos de perdas de energia, condições geométricas e simulação dos espectros. Para a execução dos cálculos serão empregados os programas computacionais específicos para aquisição e análise de dados nucleares.

**Palavras-chave:** Big-Bang não-homogêneo, reações nucleares, astrofísica nuclear

**Área do Conhecimento:** Física

### Introdução

Nas medidas de reações nucleares com interesse astrofísico referem-se as seções de choque que permite calcular as taxas de reação. Algumas razões entre seções de choque podem ser empregadas em modelos cosmológicos, por exemplo,  $^{12}\text{C}/^{16}\text{O}$ <sup>1,2</sup>. Outros parâmetros nucleares associados às reações fornecem indicações importantes no entendimento da formação do Universo. No modelo padrão, mais conhecido como Big-Bang a quantidade de neutrons produzida é rapidamente termalizada e consumida pela sopa cósmica no Universo primordial<sup>3</sup>. Deste modo, as reações que precisam de neutrons para sua existência e manutenção são descartadas dos ciclos iniciais. Entretanto, em outros modelos não-homogêneo<sup>4</sup>, as reações envolvendo nêutrons tornam-se relevantes no seqüenciamento evolutivo de algumas estrelas e mesmo no Universo primordial, um exemplo é a possível existência do  $^5\text{Li}$  com uma meia-vida bastante baixa. As reações associadas a produção de núcleos exóticos (vidas médias curtas e longe da linha de estabilidade) também podem fornecer informações adicionais a estes modelos.

Em ambientes astrofísico, a maioria das reações termonucleares envolve medidas experimentais tecnicamente complicadas no que diz respeito às taxas de produção de feixes primários ou secundários baixas, bem como a utilização de alvos isentos de contaminantes na região de interesse. Entretanto, o problema principal refere-se ao fato de que algumas reações apresentam valores de seção de choque muito baixos no intervalo de energia do pico de Gamow<sup>2</sup>, mesmo aquelas com núcleos estáveis, por exemplo, a reação de captura  $\alpha + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$ , onde  $^{12}\text{C}$  é um núcleo estável<sup>1,2</sup>. O acesso às

informações nesse intervalo de energia, muitas vezes, só é possível através de modelos teóricos que utilizam parâmetros nucleares nas suas previsões e são fortemente dependentes da precisão dos dados medidos para essas energias.

O principal objetivo desse trabalho é buscar algumas reações nucleares envolvidas no nucleossíntese com implicações no modelo padrão não-homogêneo. Esta busca consistirá na verificação das condições experimentais que deverão ser estabelecidas para a utilização dos feixes produzidos no Laboratório Aberto de Física Nuclear da Universidade de São Paulo ou no sistema similar na Universidade de Notre Dame nos Estados Unidos. Essas condições além da determinação do feixe, do alvo e dos detectores a serem empregados na experiência estão previstos os cálculos de perda de energia, ângulos sólidos e o posicionamento angular dos detectores de partículas. Futuramente, as condições experimentais que serão encontradas a partir deste estudo servirão de base para propostas específicas de experimentos (medidas das reações nucleares de interesse em modelo cosmológico não-homogêneo).

### Metodologia

Para a compreensão do caminho traçado para alcançar o objetivo geral, este trabalho propõe planificar, no contexto da Física Nuclear, a realização de um experimento em Astrofísica Nuclear focando em duas reações nucleares relevantes nos modelo cosmológico não homogêneo. Deste modo, a primeira etapa consiste em uma pesquisa bibliográfica tendo como foco medidas recentes onde foram empregados um dos aceleradores. A segunda etapa está centrada na escolha propriamente das

reações nucleares e no aprendizado sobre como utilizar os programas computacionais envolvidos nos cálculos dos parâmetros da montagem experimental. Nesta etapa, será empregada uma reação nuclear já medida em um dos sistemas já citados (por exemplo, o sistema RIBRAS - *Radioactive Ions Beams in Brazil*)<sup>6,7</sup>. Na terceira e última etapa, as reações selecionadas terão suas condições estabelecidas a partir dos cálculos de produção do feixe (no caso de alvos secundários), perdas de energia nos elementos previstos (absorvedores, janelas dos detectores) até à incidência no alvo, verificação da eficiência e do ângulo sólido dos detectores (escolha dos detectores), posicionamento angular dos detectores na câmara de espalhamento do sistema, número de contagens no pico de interesse, determinação dos contaminantes do feixe e daqueles produzidos nos alvos primários ou secundários. Como parte dos cálculos, está prevista a simulação das trajetórias das partículas-produtos para o sistema em questão. O desenvolvimento desse projeto será totalmente viabilizado pela atual infra-estrutura da UNIFESP no campus Diadema. Esta infra-estrutura refere-se à utilização de um micro-computador para a instalação dos programas computacionais. A validade das condições experimentais estabelecidas está vinculada ao número de contagens presentes no pico e à otimização dos parâmetros que tornam possível a medida em um dos sistemas.

## Resultados

Pela natureza deste trabalho, os resultados estão vinculados a escolha das reações nucleares. Neste sentido, tratando-se da etapa inicial deste trabalho, será apresentado a limitação do sistema que se pretende empregar para o cálculo das condições experimentais.

Inicialmente, os cálculos serão efetuados para o sistema RIBRAS (Radioactive Ions Beams in Brazil) no Laboratório Aberto de Física Nuclear/Linac. Este sistema permite a produção de feixes radiativos leves ( $6 < A < 20$ ) e de baixa energia, o que favorece os estudos de reações nucleares de interesse astrofísico.

Atualmente, as medidas experimentais neste sistema estão limitadas ao uso de um solenóide supercondutor, cujo campo magnético central é de 6,6T e a aceitação angular é de  $2^\circ \leq \theta_{lab} \leq 15^\circ$ . O feixe primário será fornecido pelo acelerador Pelletron que opera de 3 - 5MeV/nucleon com uma tensão no terminal de 8MV.

A montagem do experimento é feita em uma câmara de espalhamento localizada logo após o solenóide. Esta câmara possui um prato giratório,

onde os telescópios (conjuntos de detectores) podem ser posicionados em relação ao feixe incidente. Os feixes primários intensos ( $10^{12}$ pps do Acelerador Pelletron são de  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}$  e  ${}^{10}\text{B}$  e podem produzir os feixes radioativos no RIBRAS a partir de reações de transferência de poucos nucleons (Tabela 1).

Tabela 1- Reações de transferência de poucos nucleons usados na produção de feixes radioativos com o sistema RIBRAS.

Feixe Secundário	Reação de Produção ( $E_{7\text{Li}}=32\text{MeV}$ )	Produção de partículas/seg por $1\mu\text{A}$ de feixe primário
${}^6\text{He}$	${}^9\text{Be}({}^7\text{Li}, {}^6\text{He})$	$10^5$
${}^8\text{Li}$	${}^9\text{Be}({}^7\text{Li}, {}^8\text{Li})$	$10^6$
${}^7\text{Be}$	${}^3\text{He}({}^6\text{Li}, {}^7\text{Be})$	$10^5$
${}^7\text{Be}$	${}^3\text{He}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be})$	$10^5$
${}^8\text{B}$	${}^3\text{He}({}^6\text{Li}, {}^8\text{B})$	$10^4$

O sistema de produção consiste de uma célula de gás com uma janela de Havar de  $2,2\mu\text{m}$  e uma janela de saída de  ${}^9\text{Be}$  de  $16\mu\text{m}$  (podendo ser usada como alvo de produção). Outras possibilidades com relação ao alvo de produção é a utilização de um alvo gasoso. Neste caso, a folha de berílio pode ser substituída por Havar e a pressão pode ser alterada.

A câmara de espalhamento do RIBRAS possui um diâmetro de 240mm e 240mm de altura. No seu centro localiza-se o porta alvos (capacidade para 3 alvos simultâneos). Este porta-alvos permite a variação dos alvos e da posição angular sem comprometer a qualidade do vácuo.

O sistema de detecção típico é composto pelos telescópios  $\Delta E$ , E1 e E2 de barreira de superfície de Silício. Os telescópios são posicionados no prato giratório graduado. Isto permite a variação dos ângulos entre os telescópios e o feixe incidente do alvo secundário.

## Discussão

A escolha das reações nucleares está vinculada às limitações na produção do alvo primário e secundário do sistema RIBRAS. Nesta etapa inicial, o programa LISE++ será empregado para verificar as condições dos primeiros experimentos realizado no RIBRAS<sup>6,7</sup>. No primeiro experimento foram obtidas as seções de choque de espalhamento elástico e de reação empregando um feixe de  ${}^6\text{He}$  em alvos de  ${}^{27}\text{Al}$ . Enquanto, no segundo experimento, as medidas foram de espalhamento elástico das reações nucleares  ${}^{51}\text{V}({}^6\text{Li}, {}^8\text{Li}){}^{51}\text{V}$  e  ${}^{51}\text{V}({}^6\text{He}, {}^6\text{He}){}^{51}\text{V}$ . Como exemplo podemos citar os valores obtidos para o

segundo referente as características do feixe secundário (Tabelas 2) . As energias leva em consideração as perdas de energia em todo percurso do feixe até atingir o alvo de  $^{51}\text{V}$ .

Tabela 2-Parâmetros do feixe secundário considerando as perdas de energia.

Feixe Secundário	Energia do feixe secundário no centro do alvo ( $E_{7\text{Li}}=32\text{MeV}$ )	Produção de partículas/seg por $1\mu\text{A}$ de feixe primário
$^4\text{He}$	23,2 MeV	$1,6 \times 10^5$
$^6\text{He}$	15,4 MeV	$1,1 \times 10^6$
$^8\text{Li}$	30,2 MeV	$5,0 \times 10^5$

As espessuras dos alvos de  $^{51}\text{V}$  e  $^{197}\text{Au}$  (empregado para a calibração do sistema e normalização da seção de choque) foram de  $1,9\text{mg}/\text{cm}^2$  e  $5,1\text{ mg}/\text{cm}^2$ , respectivamente. Os ângulos sólidos estão na Tabela 3.

Tabela 3- Dispersão angular do feixe secundário no alvo de  $^{51}\text{V}$ .

Sistema	$E_{\text{lab}}$ (MeV)	$\theta_{\text{min}}-\theta_{\text{máx}}(^{\circ})$
$^4\text{He}+^{197}\text{Au}$	22,80/15,20	2,1-4,0
$^6\text{He}+^{197}\text{Au}$	23,10	2,1-4,0
$^8\text{Li}+^{197}\text{Au}$	25,60	2,1-4,0

O espectro biparamétrico gerado a partir do programa Lise++, os parâmetros do feixe, tais como, taxa de produção, perdas de energia e ângulo sólido são relevantes. Neste sentido, essas reações, já medidas no RIBRAS, podem servir como resultados preliminares na avaliação do desempenho do cálculo dos parâmetros.

## Conclusão

Uma medida em astrofísica nuclear requer o conhecimento do sistema de medidas e suas limitações. Neste sentido, a proposição de um experimento passa por cálculos preliminares para demonstrar a viabilidade da medida experimental. No caso, de experimentos na região do Big-Bang não-homogêneo, as reações nucleares de captura direta ou transferências envolvem os nêutrons.

Uma das etapas deste trabalho consiste nos cálculos de perdas de energia do feixe primário e secundário até atingir os detectores. Outro ponto importante está relacionado à configuração geométrica dos detectores e alvo e suas implicações no número total de contagens.

A simulação do espectro biparamétrico, bem como a correção dos dados experimentais demonstram a viabilidade da medida experimental.

A medida seções de choque de espalhamento elástico e de reação empregando um feixe de  $^6\text{He}$  em alvos de  $^{27}\text{Al}$  e as medidas de espalhamento elástico das reações nucleares  $^{51}\text{V}({}^8\text{Li}, {}^8\text{Li})^{51}\text{V}$  e  $^{51}\text{V}({}^6\text{He}, {}^6\text{He})^{51}\text{V}$  serão empregadas para familiarização com o programa Lise++.

## Referências

[1] ASSUNÇÃO, M.; FEY, M.; LEFEBVRE-SCHUHL, A.; KIENER, J.; TATISCHEFF, V.; COC, A.; et al, E1 and E2 S factors of  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma_0)^{16}\text{O}$  from  $\gamma$ -ray angular distributions with a 4pi-detector array. **Phys. Rev. C**, V. 73, p. 055801, 2006.

[2] HAMMER, J.W.; FEY, M.; KUNZ, R.; KIENER, J.; TATISCHEFF, V.; HAAS, F.; ASSUNÇÃO, M.; et al., E1 and E2 capture cross section and astrophysical reaction rate of the key reaction  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ . **Nucl. Phys. A**, V. 758, p. 363-366, 2005.

[3] ROLFS, C.E.; RODNEY, W.S.; "Cauldrons in the Cosmos", The University of Chicago Press, 1.ed. Chicago – USA, 1988.

[4] GUIMARÃES, V.; LICHTENTHALER, R.; CAMARGO JR., O.; BARIONI, A.; ASSUNÇÃO, M.; KOLATA, J.J.; AMRO, H.; BECCHETTI, F.D.; AGUILERA, E.F.; MARTINEZ-QUIROZ, E.; Neutron transfer reaction induced by  $^8\text{Li}$  on  $^9\text{Be}$ . **Phys Rev. C** V. 75, p. 054602-1, 2007.

[5] LICHTENTHÄLER, R.; LÉPINE-SZILY, A.; GUIMARÃES, V.; LIMA, G.F.; HUSSEIN, M.S.; **Nucl. Instr. And Method in Phys. Research A** V.505, n.1-2, p.612-615, 2003 e **Braz. Jou. Of Phys.**, V.33, n.2, p.294-296, 2003.

[6] BENJAMIM, E.A. ; Estudo do espalhamento elástico entre núcleos pesados leves estáveis e radioativos, 2006, 174f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 2007.

[7] ALMEIDA, V.M. de; Estudo do espalhamento elástico de projéteis exóticos por alvo de massa intermediária. 2007, 85f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 2007.

