

**LABORATÓRIO ABERTO
DE FÍSICA NUCLEAR**

N°

Proposta de Experimento

Período : segundo semestre 2011

Título: Investigação de reações de espalhamento elástico com feixes radioativos e alvo gasoso.

Responsável: Valdir Guimarães e Leandro Gasques.
e-mail: valdirg@dfn.if.usp.br

Participantes:

Gayane Karapetyan, Davi Monteiro, Valdir Scarduelli, Ernesto S. Rossi Jr, Adriana Barioni, Alinka Lepine-Szily, Rubens Lichtenthaler, Pedro Neto de Faria, Djalma Mendes Jr., Viviane Morcelle, Kelly C. C. Pires, Ruben Pampa Condori, Maria Carmem Morais e Erich Leistenschneider.

Porta Voz: Valdir Guimarães
e-mail: valdirg@dfn.if.usp.br

Número de dias solicitados: 10 dias
Datas preferidas: segundo semestre 2011
Datas realmente impossíveis:
Canalização: 45-B - RIBRAS

| Feixe | Est. Carga | I_{mínima} (alvo) | V_{min} | V_{max} | Pulsado? |
|-----------------|-------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| ⁶ Li | 3 | 400 nA | 5 | 7 | não |
| | | | | | |

Alvos: ⁴He e ¹⁹⁷Au

Pastilhas:

Características de Feixe Pulsado:

Continuação da Experiência já Aprovada N°: não

Outras informações:

Investigação de reações de espalhamento elástico com feixes radioativos e alvo gasoso.

Responsável: **Valdir Guimarães e Leandro Gasques**

Colaboradores: Davi Monteiro, Gayane Karapetyan, Valdir Scarduelli, Ernesto S. Rossi Jr, Adriana Barioni, Alinka Lepine-Szily, Rubens Lichtenthaler, Pedro Neto de Faria, Djalma Mendes Jr., Viviane Morcelle e Kelly C. C. Pires, Ruben Pampa Condori, Maria Carmem Moraes e Erich Leistenschneider.

Motivação Científica

O projeto consiste na investigação de reações de espalhamento elástico utilizando feixes radioativos em um alvo gasoso de ${}^4\text{He}$. Essas reações serão medidas como o primeiro estágio para o desenvolvimento da instrumentação necessária para se investigar reações mais complexas do tipo (α, p) , (α, n) e (p, α) de interesse astrofísico.

Reações (α, p) e (α, n) são muito importantes em vários ambientes astrofísicos. Normalmente a formação e síntese dos elementos nos vários cenários astrofísicos tais como universo primordial, meio intergalático, estrelas, explosões de novas e supernovas, se dá por meio de reações nucleares de captura de prótons, neutrons ou alfas, (p, γ) , (n, γ) e (α, γ) . Mas também, dependendo da densidade e temperatura, reações do tipo (p, α) , (n, α) , (α, p) , (α, n) se tornam importantes. Estamos particularmente interessados em reações (α, p) e (α, n) induzidas por núcleos ricos em prótons ou neutrons. Apesar desses núcleos terem uma vida-média curta, eles podem ter uma participação muito importante no processo de formação dos elementos estáveis. A falha de núcleos com massa $A=8$ por exemplo, pode ser superada, e elementos mais pesados podem ser sintetizados através das reações envolvendo exatamente núcleos ricos em neutrons e prótons tais como ${}^8\text{B}$ e ${}^8\text{Li}$ com as reações ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ e ${}^8\text{B}(\alpha, p){}^{11}\text{C}$. As reações envolvidas na nucleossíntese dos elementos leves num modelo onde teríamos a presença de núcleos radioativos como o ${}^8\text{Li}$ e ${}^8\text{B}$ podem ser vistas esquematicamente na Figura 1. Reações envolvendo esses núcleos ricos em

prótons e neutrons podem ocorrer também em estrelas supermassivas. Estrelas supermassivas, tais como as primeiras estrelas do universo, são estrelas bastante densas mas com baixa metalicidade (rica em Hidrogênio e Hélio mas pobre em elementos mais pesados). Nessas estrelas a temperatura e densidade são suficientemente altas para que as reações de captura de partículas alfa, além de captura de prótons, tenham alta propabilidade. Esses ambientes de alta temperatura e densidade e com uma grande quantidade de prótons, são propícios para formar núcleos ricos em prótons como o ${}^7\text{Be}$ e ${}^8\text{B}$. Além disso, essas estrelas possuem uma quantidade muito grande de ${}^4\text{He}$ favorecendo as reações (α, p) .

É muito importante fazer medidas diretas dessas reações. No entanto, para várias reações, a medida e investigação direta nas energias de interesse astrofísico, apesar de tecnicamente possível, é muito difícil devido a baixa seção de choque e dificuldades experimentais em se medir e detectar partículas com energias tão baixas. Portanto, métodos indiretos, tais como, estudos de dissociação coulombiana, que corresponde a reação inversa temporal da reação de captura, estudo das ressonâncias através de medidas de espalhamento com cinemática inversa ou ainda o modelo de potencial, que utiliza fatores espectroscópicos de reações de transferência para normalização da seção de choque de captura, acabam sendo de fundamental importância. Para tanto, feixes radioativos em energias próximos a barreira coulombiana são bastante convenientes para aplicação desses métodos.

Um desses métodos indiretos, que tenho trabalhado juntamente com o prof. Carlos Bertulani, para se obter as seções de choque de captura de núcleos leves radioativos, corresponde a cálculos com modelos fenomenológicos de potencial, veja ref. [1, 2]. Nesses modelos fenomenológicos de potencial a seção de choque de captura, σ_{CAP} , para uma reação genérica $A + x = B$, pode ser esquematicamente determinada pela seguinte equação:

$$\sigma_{CAP} = \lambda \times | \langle I_{Ax} | O(r) | \Psi_{SCAT} \rangle |^2, \quad (1)$$

onde λ corresponde aos fatores cinemáticos, I_{Ax} é a integral radial de overlap das funções de onda para o estado ligado, $B = A + x$, $O(r)$ é o operador de transição eletromagnética e Ψ_{SCAT} é a função de onda das partículas no contínuo e x pode ser um próton, um neutron, ou um cluster de partículas. Portanto, nesse modelo fenomenológico, para determinarmos a seção de choque de captura de um próton ou neutron por um núcleo, os ingredientes necessários são os

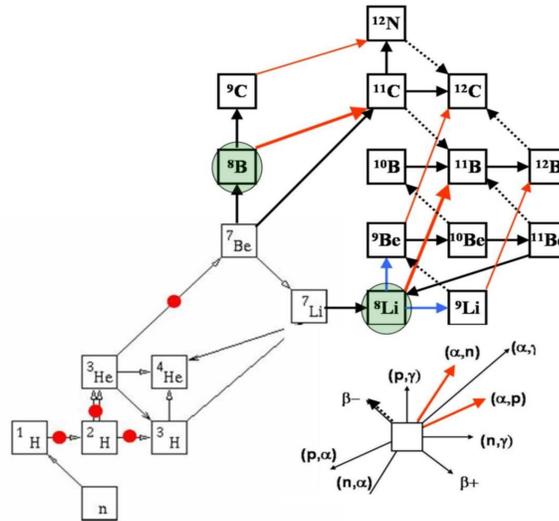


Figure 1: Ilustração esquemática das reações envolvidas na nucleossíntese dos elementos leves.

parâmetros dos potenciais de espalhamento que descrevem o estado no contínuo Ψ_{SCAT} de $A+x$, potenciais para os estados ligados I_{Ax} e factores espectroscópicos dos núcleos envolvidos.

Estudamos várias reações de captura de prótons e neutrons com esse modelo fenomenológico e queremos agora aplicar esse modelo para reações de captura alfa. Para tanto, precisaremos de parâmetros de potenciais que descrevam o espalhamento elástico de núcleos radioativos e/ou exóticos em alfas.

Medidas de espalhamento elástico.

O potencial de espalhamento nucleon-núcleo é bastante importante na determinação da seção de choque de captura conforme mostrado nos trabalhos das refs. [3, 4]. A determinação dos parâmetros desse potencial de espalhamento depende de medidas de espalhamento elástico em energias relativamente baixas. Quando não dispomos de dados experimentais de espalhamento elástico para determinar os parâmetros de potencial, potenciais fenomenológicos de espalhamento do tipo double-folding [5] acabam sendo usados. No entanto, um teste extensivo sobre a possibilidade do uso desses potenciais para descrever o espalhamento de núcleos por prótons ou Hélio ainda não foi explorado. Assim sendo, um dos objetivos desse trabalho é estudar e testar a possibilidade de se usar o potencial double-folding de Sao Paulo [5] como potencial de

espalhamento em cálculos fenomenológicos de seção de choque de captura. Com as medidas de distribuição angular de espalhamento elástico do feixe radioativos de ${}^6\text{He}$, ${}^7\text{Be}$ e ${}^8\text{B}$ em alvo gasoso de prótons e/ou ${}^4\text{He}$ poderemos verificar e testar a viabilidade de se usar tais potenciais.

Proposta de Experiências.

Como proposta de experiência temos medidas de distribuição angular e funções de excitação (probabilidade da reação em função da energia) para o feixe radioativo de ${}^7\text{Be}$ em alvo gasoso de ${}^4\text{He}$, em cinemática inversa. Para as medidas de distribuição angular de espalhamento elástico vamos usar a técnica de alvo fino em cinemática inversa. Com essa técnica iremos detectar as partículas espalhadas do feixe com e sem coincidência com as partículas de recuo do alvo. Para as medidas da função de excitação das reações utilizaremos a técnica do alvo grosso onde detectaremos as alfas de recuo. Como essas reações passam pelos núcleos compostos poderemos investigar a influência das ressonâncias desses núcleos compostos no espalhamento elástico.

Primeiramente mediremos uma distribuição angular para o espalhamento elástico de ${}^7\text{Be}$ em um alvo gasoso fino de ${}^4\text{He}$ com energia em torno de 25 MeV. O alvo deve ter uma densidade areal de aproximadamente 0.500 mg/cm^2 . Com essa energia, tanto as partículas espalhadas de ${}^7\text{Be}$ como as alfas de recuo podem atravessar o alvo gasoso e podem ser detectadas em ângulos entre 15 a 30 para o ${}^7\text{Be}$ e 40 a 80 graus para as alfas, com um conjunto de detectores formando telescópios E- Δ E, ou detectores E- Δ E do tipo *strip*. A densidade do alvo deverá ser controlada pela pressão e devemos utilizar uma pressão em torno ou um pouco maior que 1 atm. Esse tipo de medida já foi realizada anteriormente no laboratório na tese de mestrado do aluno Robson Denke sob minha orientação [10]. Nesse trabalho havíamos investigado o espalhamento elástico do sistema ${}^7\text{Li}+{}^4\text{He}$ utilizando o feixe estável de ${}^7\text{Li}$ e um alvo gasoso de ${}^4\text{He}$. No entanto, vamos agora usar feixes radioativos e para isso deveremos construir um alvo gasoso com dimensões e geometria apropriadas.

A próxima medida seria utilizando a técnica de alvo grosso onde, em cinemática inversa, incidimos um feixe radioativo de ${}^7\text{Be}$ em um alvo gasoso de ${}^4\text{He}$ espesso. Ou seja, mediremos a função de excitação para o espalhamento para a reação $\alpha({}^7\text{Be},\alpha){}^7\text{Be}$ com um alvo grosso, detectando as alfas emitidas da reação. Utilizaremos feixe radioativo secundário de ${}^7\text{Be}$ em energias em torno de 15 a 20 MeV. Para obtermos uma densidade maior, o alvo gasoso deverá ser

resfriado a temperatura próxima da temperatura de Nitrogênio Líquido. Com esse resfriamento poderemos ter uma densidade 3 vezes maior do que aquela obtida em temperatura ambiente. Se o comprimento do alvo gasoso for de 2.0 cm teremos uma espessura equivalente de 1.2 mg/cm^2 . Usaremos janelas de entrada e saída com folhas de Havar de 2.0 a 4.0 μm de espessura. Nessa técnica, o alvo gasoso deve ser espesso o bastante para frear o feixe do elemento pesado mas fino o suficiente para permitir a passagem das partículas leves de recuo, como as alfas. Conforme o feixe vai sendo freado dentro do alvo gasoso, a partir de uma energia incidente inicial, as alfas terão energia menor. Picos no espectro de energia das alfas corresponderiam exatamente as ressonâncias formados pelo núcleos feixe e alvo. As alfas serão detectadas por um telescópio ($\Delta E - E$) composto por detectores de barreira de superfície colocado a zero grau, após o alvo. Com o espectro de energia dessas alfas teremos a variação da probabilidade da reação em função da energia (função de excitação). Além disso, a utilização de feixe pesado e alvo leve (cinemática inversa) permite a medida em energias bastante baixas no sistema do centro de massa, e portanto mais próximas das energias astrofísicas. Este método de alvo grosso já vem sendo aplicado em outros laboratórios [9] e tem se mostrado extremamente útil para fornecer informações sobre ressonâncias do sistema composto acima do limiar de captura alfa.

A dificuldade dessas medidas será devida aos contaminantes do feixe secundário. Ao produzirmos o feixe secundário de ${}^7\text{Be}$ podemos ter contaminantes de elementos mais leves que possuem a mesma rigidez magnética tais como o ${}^6\text{Li}$ e ${}^4\text{He}$. Utilizando os dois solenóides e um degradador na câmara central esperamos eliminar os contaminantes. Estamos iniciando simulações do efeito desses degradadores para verificar qual seria o mais eficiente para termos o feixe de ${}^7\text{Be}$ o mais puro possível. Pretendemos também testar a possibilidade de utilizarmos medidas de tempo de voo com *'parallel - plateavalanchecounter* (PPAC). Com esse parâmetro extra poderemos identificar e separar na análise off-line a contribuição de cada um dos feixes contaminantes no espectro de alfas. Para as medidas de espalhamento elástico não seria necessário a informação do tempo de voo pois podemos facilmente identificar as partículas.

Devido a espessura das janelas de saída do alvo gasoso, todas as partículas, com exceção das alfas e partículas mais leves, devem ser freadas no alvo e não atingem os detectores. Algumas partículas pesadas mais energéticas que por ventura possam atravessar o alvo gasoso poderão ser bloqueadas por folhas de alumínio finas colocadas na frente do detector. Essas folhas não deverão afetar significativamente as energias das partículas alfas. O Ouro na folha de entrada

será útil para monitorarmos o feixe incidente. Um detector E de barreira de superfície será montado num ângulo fixo traseiro para medirmos o retro-espalhamento dos feixes nessa folha de Ouro e monitorarmos a intensidade dos feixes.

Para essas medidas precisaremos construir um alvo gasoso associado a um sistema de controle de pressão. Vamos construir dois alvos gasosos. Um mais fino que deverá ser utilizado com a técnica de alvo fino e outro mais grosso e refrigerado a temperatura de Nitrogênio Líquido. Esses alvos serão projetados e confeccionados nas oficinas mecânicas do Instituto de Física. Estou solicitando um auxílio FAPESP para a compra dos materiais e acessórios necessários para a construção desse alvo gasoso.

O sistema RIBRAS para produção de feixes radioativos de baixa energia já está instalado no laboratório Pelletron. Utilizando apenas um solenóide estamos produzindo feixes de ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{Li}$ e ${}^7\text{Be}$ com intensidades da ordem de 10^5 partículas/segundo. No entanto, devido aos contaminantes presentes nesses feixes estamos realizando medidas envolvendo reações de espalhamento elástico e transferência de poucos nucleons [13, 12], onde a identificação das partículas é trivial. Para realizarmos medidas mais complexas como as propostas teremos que colocar o segundo solenóide em funcionamento. Temos planos de colocar esse segundo solenóide em funcionamento no segundo semestre desse ano de 2011.

A contribuição desse trabalho será não apenas a de obter o resultado dessas reações propostas mas também a de desenvolver essa técnica para que possa ser aplicada para outros casos. Pretendemos com isso abrir uma linha de pesquisa para medidas de reações (α,p) , (α,n) e (p,α) de interesse para astrofísica.

Período de máquina solicitados

Para as medias de distribuição angular para o espalhamento elástico de ${}^7\text{Be}+{}^4\text{He}$ com alvo fino a 25 MeV estamos solicitando 5 dias de máquina, que são razoáveis para se medir uma distribuição angular com estatística em torno de 10 por cento. Pretendemos testar medidas em coincidência e com isso a taxa de contagem deve cair ainda mais. Para as medidas da função de excitação do ${}^7\text{Be}$ em ${}^4\text{He}$ com alvo grosso estamos solicitando outros 5 dias.

Estamos solicitando no total 10 dias de máquina.

References

- [1] V. Guimarães e C. A. Bertulani, *AIP conference proceedings*, vol. 1245, pg. 30. (2010).
- [2] J. T. Huang, C. A. Bertulani, V. Guimaraes, *Atomic Data and Nuclear Data Table*, 96 (2010) 824-847.
- [3] S. Typel and G. Baur *Nuclear Phys. A* 759, 247 (2005).
- [4] V. Guimaraes, et al. *Phys. Rev. C* 78, 034605 (2008).
- [5] L. C. Chamon *et al.*, *Phys. Rev. C* **66**, 014610 (2002).
- [6] M. Zadro et al. *Nucl. Phys. A* 259, 836 (2007).
- [7] S. Hamada, M. Yasue, S. Kubono, M.H. Tanaka, R.J. Peterson, *Phys. Rev. C* 49, 3192 (1994).
- [8] W. Bradfield-Smith, *et al.*, *Nucl.Instrum.Methods Phys. Res. A* 425, 1 (1999).
- [9] M. Notani, *et al.*, *Nucl. Phys.* **A738** (2004) 411.
- [10] Tese de Mestrado de Robson Denke
<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-30052007-170452>, (2007).
- [11] R. Lichtenthäler, A. Lépine-Szily, V. Guimarães, G. F. Lima, M. S. Hussein. *Nucl. Instr. and Method.***A 505** (2003) 612.
- [12] P. N. de Faria, R. Lichtenthaler, K. C. C. Pires, A. M. Moro, A. Lepine-Szily, V. Guimaraes, D. R. Mendes Jr., A. Arazi, M. Rodriguez-Gallardo, *et al.*
Physical Review C **81**, 044605 (2010).
- [13] A. Barioni, V. Guimaraes, A. Lepine-Szily, R. Lichtenthaler, D. R. Mendes Jr., E. Crema, K. C. C. Pires, M. C. Morais, V. Morcelle, P. N. de Faria, and R. P. Condori.
Physical Review C **80**, 034617 (2009)