

**LABORATÓRIO ABERTO
DE FÍSICA NUCLEAR**

Proposta de Experimento

N°

Período :

Título: *Medidas de processos inelásticos e fusão incompleta com núcleos fracamente ligados estáveis pela técnica de coincidências gama-partícula*

Responsável: J.R.B. Oliveira, L. Gasques
e-mail: zero@if.usp.br, lgasques@dfn.if.usp.br

Participantes:

J.R.B. Oliveira, L. Gasques, V. Zagatto, A. S. Freitas, D. Pereira, P.R.P. Allegro, L.C. Chamon, E.W. Cybulska, N.H. Medina, R.V. Ribas, E.S. Rossi Jr, W.A. Seale, C.P. Silva, R. Lichtenthäler Filho, V. Guimarães, J.A. Alcántara-Núñez, E. Crema, D.L. Toufen, M.A.G. Silveira, G.S. Zahn, F. A. Genezini, J.M.B. Shorto, R. Linares, J. Lubian, G.P.A. Nobre, e A. Arazi (pela colaboração Pro-Sul)

Porta Voz: J.R.B. Oliveira
e-mail: zero@if.usp.br

Número de dias solicitados: 18
Datas preferidas: a partir de maio/2011
Datas realmente impossíveis:
Canalização: 30A

Feixe	Est. Carga	I_{mínima} (alvo)	V_{min}	V_{max}	Pulsado?
6,7Li	2,3	2pnA	6	7	
9Be	3,4	2pnA	6	7	

Alvos: 120,122Sn

Pastilhas: 6Li, 7Li, 9Be

Características de Feixe Pulsado:

Continuação da Experiência já Aprovada N°:

Outras informações:

Medidas de processos inelásticos e fusão incompleta com núcleos fracamente ligados estáveis pela técnica de coincidências gama-partícula

J.R.B. Oliveira, L. Gasques, V. Zagatto, A. S. Freitas, D. Pereira, P.R.P. Allegro, L.C. Chamon, E.W. Cybulska, N.H. Medina, R.V. Ribas, E.S. Rossi Jr, W.A. Seale, C.P. Silva, R. Lichtenthäler Filho, V. Guimarães, J.A. Alcántara-Núñez, E. Crema

Instituto de Física da USP, São Paulo, SP, Brazil

D.L. Toufen

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Guarulhos, SP, Brazil

M.A.G. Silveira

Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brazil

G.S. Zahn, F. A. Genezini, J.M.B. Shorto

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brazil

R. Linares, J. Lubian

Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brazil

G.P.A. Nobre

Lawrence Livermore National Laboratory, CA, USA

A. Arazi (pela colaboração Pro-Sul)

Laboratorio Tandar, Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. General Paz 1499, 1650 San Martín, Buenos Aires, Argentina

Resumo

Propõe-se a medida das reações de ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be} + {}^{120}\text{Sn}$ a energias de 18 a 26 MeV pela técnica de coincidências gama-partícula carregada com o espectrômetro Saci-Perere. Estas medidas tem caráter inédito, e permitem obter simultaneamente as seções de choque dos canais inelásticos e de transferências para estados excitados e fusão incompleta, como função do ângulo de espalhamento e energia do feixe, além de permitir uma boa estimativa da fusão completa pela técnica de gama simples. Estas medidas são relevantes para a compreensão dos mecanismos de reação envolvidos e para o desenvolvimento de modelos nucleares que visam a previsão das seções de choque dos diversos canais de reação. Reações com núcleos fracamente ligados tem grande importância para os processos astrofísicos, nos quais importa também as reações com núcleos radioativos.

1. Introdução

A técnica de medidas de coincidências gama-partícula foi recentemente implantada no LAFN [1,2], através de uma adaptação de colimadores ao sistema Saci [3] de detecção de partículas carregadas. As possibilidades de utilização desta técnica são promissoras, e estamos estabelecendo um programa de pesquisa que visa explorar e ampliar estas possibilidades. Resultados recentes, por exemplo, mostraram que é possível obter informações seletivas de boa qualidade desde processos inelásticos até fusão completa e incompleta.

O entendimento dos processos de fusão e de quebra dos núcleos (*breakup*) é de fundamental relevância para a formação de núcleos fora do limite da estabilidade, de elementos super-pesados, e para o estudo dos processos que ocorrem durante cenários explosivos em estrelas massivas [4].

Ao longo dos últimos anos, experimentos com feixes fracamente ligados (estáveis ou radioativos) tem mostrado que o *breakup* afeta de maneira significativa a seção de choque de fusão, bem como outros processos de reação [5-7]. Seções de choque de fusão completa (FC) são suprimidas em energias acima da barreira quando comparadas com previsões teóricas. Até recentemente, isto era atribuído apenas à baixa energia de

ligação dos projéteis, que podem romper antes de atingir a barreira de fusão. Trabalhos recentes demonstram que o processo de transferência de núcleons é importante, favorecendo a quebra dos núcleos fracamente ligados [8]. Medidas de seção de choque de fusão incompleta (FIC), que ocorre quando nem todos os fragmentos são capturados pelo alvo, sugerem que a probabilidade de quebra dos núcleos ${}^6,7\text{Li}$ e ${}^{10}\text{B}$ não depende da carga do núcleo alvo, enquanto resultados de reações envolvendo ${}^9\text{Be}$ indicam que a probabilidade diminui com o valor de Z do alvo (vide figura 1). Mais resultados experimentais, cobrindo uma região maior de valores de carga dos núcleos alvo, são necessários para a compreensão da dependência da probabilidade de quebra dos projéteis com o alvo.

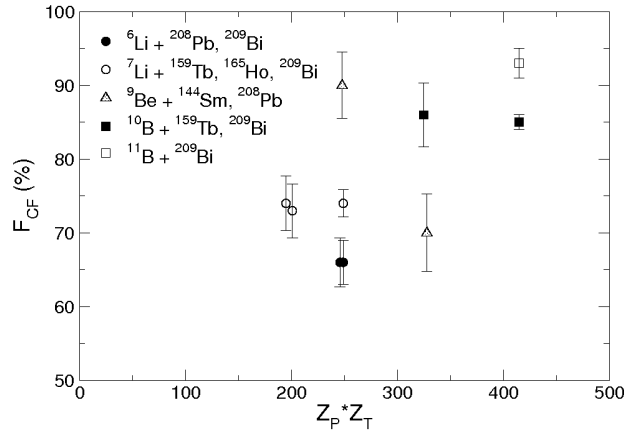


Figura 1. Fator de supressão da fusão completa como função do produto da carga dos núcleos projétil e alvo para diferentes reações envolvendo núcleos fracamente ligados [7].

A descrição simultânea dos processos de quebra e fusão completa e incompleta dos fragmentos constitui um grande desafio para as teorias de reação nuclear. A fusão completa e a incompleta são processos irreversíveis (ao menos para efeitos práticos), e possivelmente também o próprio processo de *breakup*, havendo estreita relação com a perda de coerência do sistema, um aspecto de interesse geral para os fundamentos da mecânica quântica [9]. As medidas experimentais deste tipo de sistema ajudam a definir e classificar os processos físicos relevantes e guiar a formulação dos modelos teóricos.

O espalhamento quase-elástico de ${}^{6,7}\text{Li}$ em ${}^{120}\text{Sn}$ já foi medido no LAFN [10]. Os resultados daquele trabalho contribuíram de forma significativa para a elaboração de modelos teóricos para o mecanismo destas reações. Como relatado nas refs. [10-12], especialmente para os feixes de Li, o acoplamento com estados do contínuo resulta em um potencial de polarização que efetivamente reduz o potencial real por um fator 0.6. Com esse potencial recuperam-se os resultados obtidos via CDCC (*continuum discretized coupled-channels*) [13]. A figura 2 ilustra os resultados dos cálculos de distribuições angulares baseados nos modelos teóricos para os primeiros estados excitados do projétil e do alvo. A figura foi preparada para a reação de ${}^7\text{Li} + {}^{122}\text{Sn}$, medida em um teste de coincidências gama-partícula com o espectrômetro Saci-Perere no LAFN. Para ${}^7\text{Li} + {}^{120}\text{Sn}$ os resultados são semelhantes. Nota-se que há forte dependência com relação aos parâmetros dos cálculos. As medidas que pretendemos realizar, portanto, permitirão testar a validade dos modelos correspondentes. Salientamos a importância da medida dos diversos processos envolvidos na reação como a melhor forma de avaliar a qualidade dos modelos teóricos que objetivam a descrição simultânea destes processos. Não raro é possível, sobretudo com ajuste de alguns parâmetros, a descrição de algum aspecto específico (tipicamente o espalhamento elástico), que se mostra, no entanto, incompatível com dados de outros processos.

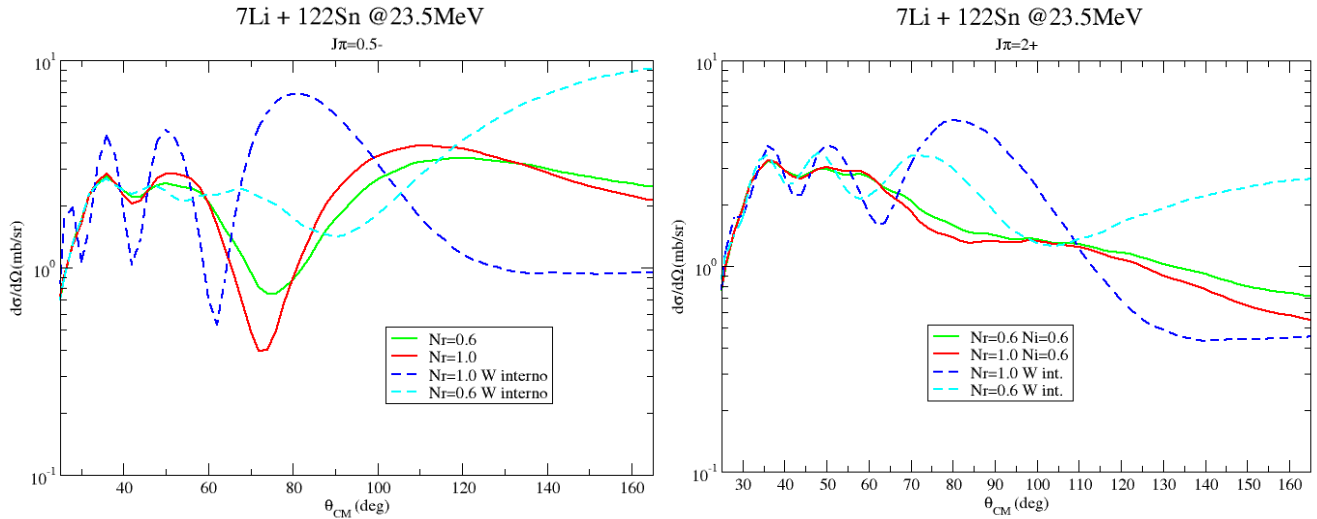


Figura 2. Distribuições angulares teóricas para os primeiros estados excitados do feixe, $J^\pi=0.5^-$ (esquerda), e do alvo, $J^\pi=2^+$ (direita), para a reação de ${}^7\text{Li}+{}^{122}\text{Sn}$ a 23.5 MeV. A legenda da figura indica o fator de normalização do potencial real (Potencial de São Paulo, V_{SPP}) Nr , e o potencial imaginário utilizados nos cálculos ($W=0.6V_{SPP}$, ou imaginário interno somente: potencial de Woods-Saxon com parâmetros $a=0.2$ e $V_0=100$ MeV). Foi utilizado o programa FRESCO com acoplamento dos canais relevantes na realização destes cálculos. Os resultados indicam também que o estado 4^+ do ${}^{122}\text{Sn}$ contribui de forma desprezível (da ordem de 10^{-3} mb/sr) para a alimentação superior do nível de 2^+ .

2. A técnica de coincidências gama-partícula

A alta resolução em energia dos detectores gama de GeHP permite, na maioria dos casos, a identificação das transições gama características dos resíduos das reações nucleares, e por conseguinte, os próprios resíduos bem como os estados populados (à exceção do canal elástico e transferências para o estado fundamental – para estes é necessário realizar uma medida complementar capaz de discriminar, ao menos, os processos quase-elásticos). A extração das seções de choque diferenciais de espalhamento pela técnica de coincidências gama partícula, porém, não é uma tarefa trivial. Apesar da qualidade e seletividade visível nos espectros (após tratamento adequado – vide, por exemplo, a apresentação em <http://www.dfn.if.usp.br/~zero/SemiFSU.pdf>), as áreas dos picos gama estão ligadas indiretamente à seção de choque. Diversos efeitos devem ser cuidadosamente levados em conta:

- 1) A orientação dos spins dos estados nucleares produzidos.
- 2) A anisotropia gama das transições emanadas destes estados, atenuada pela interação hiperfina em vácuo (no caso de alvos finos) e atenuada geometricamente pelas dimensões finitas dos detectores.
- 3) Correções de efeito Doppler (na energia das transições), sobretudo nas transições do projétil.

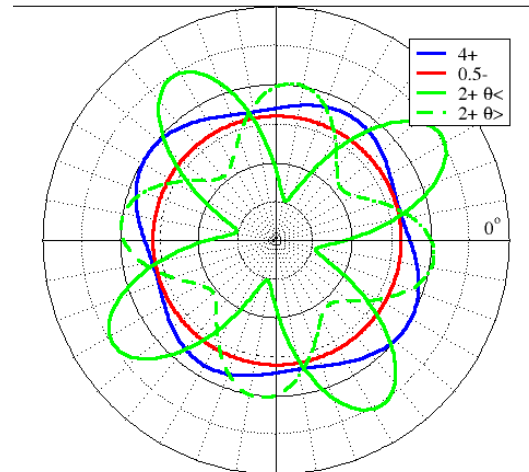


Figura 3. Distribuições angulares das transições gama dos canais inelásticos (estados 2^+ e 4^+ do ${}^{122}\text{Sn}$ e 0.5^- do ${}^7\text{Li}$) da reação de ${}^7\text{Li}+{}^{122}\text{Sn}$ a 23.5 MeV. Linhas contínuas – ângulo de espalhamento menor (30 graus), linha tracejada – ângulo maior (70 graus).

4) A alimentação gama a partir dos estados nucleares superiores, se for o caso.

Todos estes efeitos estão presentes nas medidas tradicionais de excitação coulombiana. No entanto, foi necessário desenvolver um novo programa para generalizar o cálculo da orientação dos estados nucleares (item 1) a partir das amplitudes de espalhamento $f_{m'M'mM}(\theta)$ onde m e M são os sub-estados magnéticos dos núcleos do canal de entrada e m' e M' os do canal de saída) obtidas do cálculo da reação nuclear (incluindo as interações nuclear e Coulombiana) com canais acoplados (*e.g.* Programa FRESCO). A figura 3 ilustra as previsões para distribuição angular dos raios gama dos canais inelásticos da reação de ${}^7\text{Li}+{}^{122}\text{Sn}$ a 23.5 MeV, feita com o programa desenvolvido para esta finalidade. No caso de fusão total ou incompleta informações das amplitudes de espalhamento ou tensor estatístico de população dos estados devem ser também calculadas por outro programa (*e.g.* PACE) de forma a ser possível o cálculo da anisotropia gama. Os testes realizados para esta reação são compatíveis com estes resultados. Pode-se considerar, portanto, que a técnica está dominada no Laboratório, possibilitando a realização dos experimentos propostos.

Para as medidas de fusão incompleta/transferência de próton será ainda interessante a utilização de um sistema de tempo de voo para a separação entre ${}^6\text{He}$ e ${}^4\text{He}$. A técnica de tempo de voo é conhecida há tempos no Laboratório. Será feita uma adaptação de parte do sistema existente com um tubo de tempo de voo no lugar de um dos detectores do Saci.

3. Experimentos propostos

Pretendemos realizar as medidas das reações nucleares com os projéteis fracamente ligados ${}^6,7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, na faixa de energia do feixe de 18 a 26 MeV (desde aproximadamente a barreira até ~40% acima), em alvos de ${}^{120}\text{Sn}$ (e, eventualmente, também ${}^{122}\text{Sn}$). Alvos e feixes estão disponíveis no laboratório. Estima-se, para condições típicas (seções de choque da ordem de 1 mb/sr, abertura de 10 msr para o detector de partículas, 2 pnA de intensidade do feixe, 1mg/cm² de espessura do alvo, e eficiência de detecção de fotopico gama de 0.2%) que é necessário cerca de 24 horas por energia do feixe para acúmulo de ~100 contagens no pico de coincidências (Obs.: os ângulos sólidos dos 11 detectores de partícula carregada do Saci variam de 1 a 100 msr, no intervalo de 30 a 140 graus). Esta estimativa é corroborada pela experiência prévia com o teste realizado no LAFN de medidas de ${}^7\text{Li}+{}^{122}\text{Sn}$. Assim sendo, solicitamos três períodos de 6 dias de utilização do acelerador, um para cada feixe, objetivando a medida de cerca de 5 pontos de energia de excitação. As reações com Li constituiriam parte do trabalho de doutorado de V. B. Zagatto, e a com ${}^9\text{Be}$, mestrado de A.S. Freitas. Medidas do espalhamento elástico+quase-elástico para a reação de ${}^9\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ estão sendo realizadas em colaboração com o Laboratório TANDAR (na Argentina).

Referências

- [1] J.R.B. Oliveira *et al.*, AIP Conf. Proc. 1139, 172 (2009).
- [2] J.R.B. Oliveira *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 205 (2010) 012046 .
- [3] J.A. Alcántara-Núñez, J.R.B. Oliveira *et al.*, Nucl. Inst. Meth. A 497, (2003) 429.
- [4] K. Rehm *et al.*, Nucl. Phys. A787, 289 (2007).
- [5] M. Dasgupta *et al.*, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 48, 401 (1998).
- [6] M. Dasgupta *et al.*, Phys. Rev. C70, 024606 (2004).
- [7] L. R. Gasques *et al.*, Phys. Rev. C79, 034605 (2009).
- [8] D. H. Luong *et al.*, Phys. Lett. B695, 105 (2011).
- [13] I. J. Thompson *et al.*, Prog. Theor. Phys. Suppl. 154, 69 (2004).
- [10] D.P. de Souza *et al.*, Nucl. Phys. A 836 (2010) 1.
- [11] D. Pereira, J. Lubian, J.R.B. Oliveira, D.P. de Sousa and L.C. Chamon, Phys. Lett. B 670, 330 (2009).
- [12] Y. Sakuragi, M. Yahiro, M. Kamimura, Prog. Teor. Phys. 70 (1983) 1047.
- [13] D.R. Otomar *et al.*, Phys. Rev. C 80 (2009) 034614.