

**LABORATÓRIO ABERTO
DE FÍSICA NUCLEAR**

Proposta de Experimento

N°

Período :

Título: *Medidas de processos inelásticos e fusão incompleta com núcleos fracamente ligados estáveis ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, e ${}^{10,11}\text{B}$ 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. A. B. Zagatto, A. S. Freitas, I. Bala, C. Dantas, P.R.P. Allegro, L.C. Chamon, E.W. Cybulska, N.H. Medina, R.V. Ribas, E.S. Rossi Jr, W.A. Seale, V. Guimarães, J.A. Alcántara-Núñez, 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.

Porta Voz: V. A. B. Zagatto

e-mail: vinicius.zagatto@gmail.com

Número de dias solicitados: 6

Datas preferidas: a partir de março/2014

Datas realmente impossíveis:

Canalização: 30A

Feixe	Est. Carga	I_{mínima} (alvo)	V_{min}	V_{max}	Pulsado?
${}^6\text{Li}$	2,3	2nA	6	7	
${}^{10,11}\text{B}$	3,4	2nA	6	8	

Alvos: ${}^{120}\text{Sn}$

Pastilhas: ${}^6\text{Li}$, ${}^{10,11}\text{B}$

Características de Feixe Pulsado:

Continuação da Experiência já Aprovada N°:

Outras informações:

Medidas de processos inelásticos e fusão incompleta com os núcleos fracamente ligados estáveis ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ e ${}^{10,11}\text{B}$ pela técnica de coincidências gama-partícula

J.R.B. Oliveira, L. Gasques, V. Zagatto, A. S. Freitas, I. Bala, C. Dantas, P.R.P. Allegro, L.C. Chamon, E.W. Cybulska, N.H. Medina, R.V. Ribas, E.S. Rossi Jr, W.A. Seale, 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

Resumo

Propõe-se a medida das reações ${}^6\text{Li} + {}^{120}\text{Sn}$ a energias de 18 a 26 MeV ($E_{\text{barr}} \sim 21$ MeV), ${}^{10,11}\text{B} + {}^{120}\text{Sn}$ a energias de 32 a 40 MeV ($E_{\text{barr}} \sim 35$ MeV), e ${}^9\text{Be} + {}^{154}\text{Sm}$ ao redor da barreira ~ 40 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, 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 (as dissertações de mestrado de V. A. B. Zagatto e A. S. Freitas, e a experiência ${}^7\text{Li} + {}^{120}\text{Sn}$ proposta e realizada no último PAC) mostraram que é possível obter informações seletivas de boa qualidade desde processos inelásticos e de transferência, 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) têm 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 do núcleo ${}^6\text{Li}$ não depende da carga do núcleo alvo.

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].

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 o tratamento adequado (figura 1), 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.
- 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). 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. Pode-se considerar, portanto, que a técnica está dominada no Laboratório, possibilitando a realização do experimento proposto.

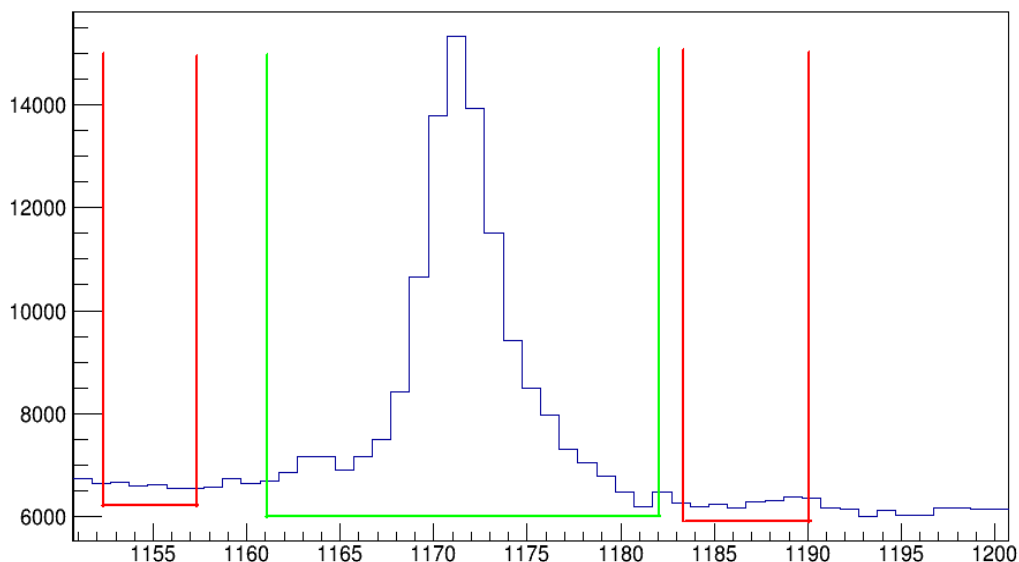


Figura 1: Espectro de raios gama em coincidência com partículas obtido na experiência ${}^7\text{Li}+{}^{120}\text{Sn}$ ($E=24\text{MeV}$) realizada no último PAC dando especial ênfase no pico de 1171 keV referente ao decaimento $2+\rightarrow 0+$ do alvo de ${}^{120}\text{Sn}$.

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 partículas de mesma carga. 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. As peças do sistema já foram usinadas nas oficinas mecânicas do IF.

3. Experimentos propostos

Pretendemos realizar as medidas das reações nucleares com os projéteis fracamente ligados ${}^6\text{Li}$ e ${}^{10,11}\text{B}$, na faixa de energia desde aproximadamente a barreira até $\sim 40\%$ acima (entre 18 a 26 MeV para o projétil ${}^6\text{Li}$ e entre 30 a 40 MeV para os projéteis ${}^{10,11}\text{B}$), em alvos de ${}^{120}\text{Sn}$, e ${}^9\text{Be}+{}^{154}\text{Sm}$ a 40 MeV. Alvos e feixes estão disponíveis no laboratório. Estima-se, para condições típicas (seções de choque da ordem de 1 mb/sr, abertura de 30 msr para o detector de partículas, 1 pA de intensidade do feixe, 1 mg/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 carregados do Saci variam de 30 a 150 msr, no intervalo de 28° a 144°). Esta estimativa é corroborada pela experiência prévia com o teste realizado no LAFN de medidas de ${}^7\text{Li}+{}^{122}\text{Sn}$ assim como da experiência ${}^7\text{Li}+{}^{120}\text{Sn}$, realizada no último PAC. Assim sendo, solicitamos um período de 18 dias de utilização do acelerador. As reações com Li constituiriam parte do trabalho de doutorado de V. A. B. Zagatto e as reações com B parte do trabalho de doutorado 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). A análise da reação de ${}^9\text{Be}+{}^{154}\text{Sm}$ ficará a cargo de uma pesquisadora visitante indiana (Indu Bala).

4. Avanços na experiência e análise

Progressos significativos foram feitos para que tanto a experiência quanto a análise possam ser otimizadas. O programa que calcula as anisotropias do decaimento gama (levando em conta os efeitos de decaimento em vácuo, tamanho finito dos detectores de partícula e de raios gama, além da perda de energia no alvo) encontra-se pronto. A interferência de cada efeito pôde ser estudada e quantificada, verificando quais são os que mais influem na anisotropia gama. Tais resultados podem ser encontrados na dissertação de V. A. B. Zagatto.

A experiência ${}^7\text{Li}+{}^{120}\text{Sn}$ encontra-se em fase final de análise e algumas distribuições angulares em escala arbitrária podem ser obtidas (figura 2). De fato, apenas cálculos teóricos confiáveis bastam ser concluídos para que um resultado possa ser publicado. A análise realizada permitiu identificar diferentes canais de reação e alguns resultados interessantes foram obtidos. Um canal de reação obtido foi a transferência de 2 nêutrons, no entanto, a transferência de 1 nêutron não foi observada. A observação ou não desse segundo canal de reação na experiência ${}^6\text{Li}+{}^{120}\text{Sn}$ pode revelar informações importantes quanto aos mecanismos de reação e estrutura dos núcleos envolvidos.

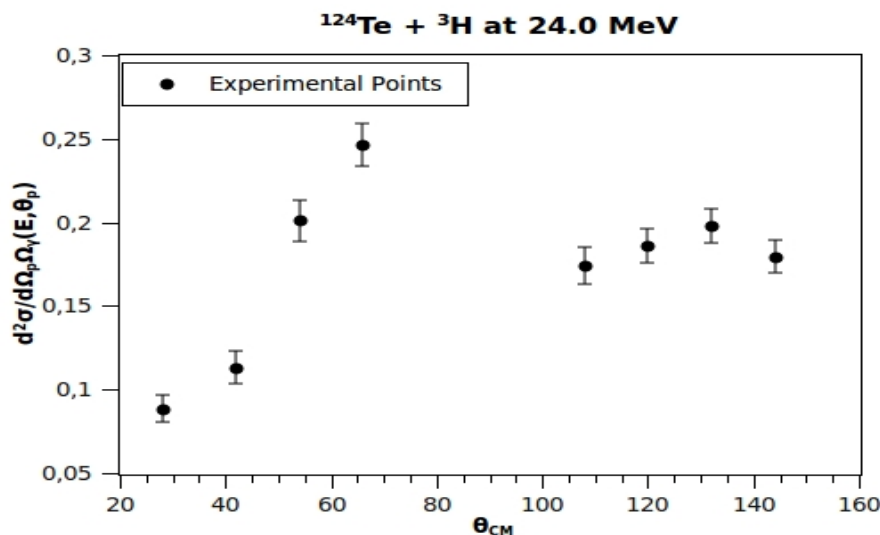


Figura 2: Distribuição angular em unidades arbitrárias referente ao núcleo ${}^{124}\text{Te}$ que pode ser produzido pela fusão incompleta ou transferência de ${}^4\text{He}$, ou pela fusão de ${}^6\text{He}$ seguida de evaporação de 2 nêutrons.

Medidas da reação ${}^9\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ foram recentemente realizadas no Laboratório e mostraram a ocorrência de excitação inelástica, identificada pela detecção de raios-gama da transição do ${}^{120}\text{Sn}$ ($2^+ \rightarrow 0^+$) em coincidência com partículas de $Z=2$ (alfas) em ângulos traseiros (fig. 3), provenientes da quebra do berílio (${}^9\text{Be} \rightarrow 2 \text{ alfa} + n$). Tais resultados podem ser encontrados na dissertação de A. S. Freitas. Nas medidas com o ${}^6\text{Li}$ e ${}^{10,11}\text{B}$ também, os canais de excitação inelástica serão examinados com o objetivo de investigar a ocorrência de processos análogos a este. No caso da reação de ${}^9\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$, a excitação do núcleo alvo pode ter ocorrido com ou sem a transferência de 1n seguida de evaporação de 1n. Nestes dois casos espera-se que as regiões de excitação do núcleo de ${}^{120}\text{Sn}$ sejam muito diferentes (baixa e alta, respectivamente). A investigação deste tipo de processo de reação tem especial relevância por ser possibilitada exclusivamente pelo sistema de coincidência gama-partícula. Estamos propondo também a medida da reação de ${}^9\text{Be}$ com o núcleo deformado de ${}^{154}\text{Sm}$, cujas transições gama da banda rotacional do estado fundamental permitirão identificar as regiões de excitação populadas em coincidência com a quebra do ${}^8\text{Be}$, tanto em energia como em momento angular. A análise destes dados ficarão a cargo de uma pesquisadora visitante indiana (Indu Bala).

Ressaltamos que a medida de ${}^6\text{Li}+{}^{154}\text{Sm}$ já foi feita no laboratório em colaboração com pesquisadores da UNAL (Colômbia). Os dados estão em análise e a comparação dos resultados com os dois feixes deve trazer informações interessantes sobre os mecanismos de reação.

A parte experimental também evoluiu. Alvos de ${}^{120}\text{Sn}$ foram importados de Oak Ridge. Além disso, a eletrônica de aquisição sofreu importantes modificações, tais como o uso de 2 QDC's em funcionamento paralelo, a fim de diminuir o tempo morto do sistema.

Um sistema de tempo de voo deverá ser testado juntamente com a experiência realizada. Tal sistema poderá nos ajudar a separar partículas evaporadas de massas diferentes. Na experiência em questão isso constitui algo de fundamental aplicação visto que os diferentes processos nucleares podem gerar partículas tais como prótons, dêuterons e trítios, impossíveis de serem diferenciados até então. Além disso, um novo plástico cintilador E mais fino e com maior resolução foi comprado. Estima-se que tal plástico permitirá separar partículas até $Z=8$, atualmente a máxima separação é até $Z=3$ (para as energias típicas no qual as experiências são realizadas no acelerador Pelletron).

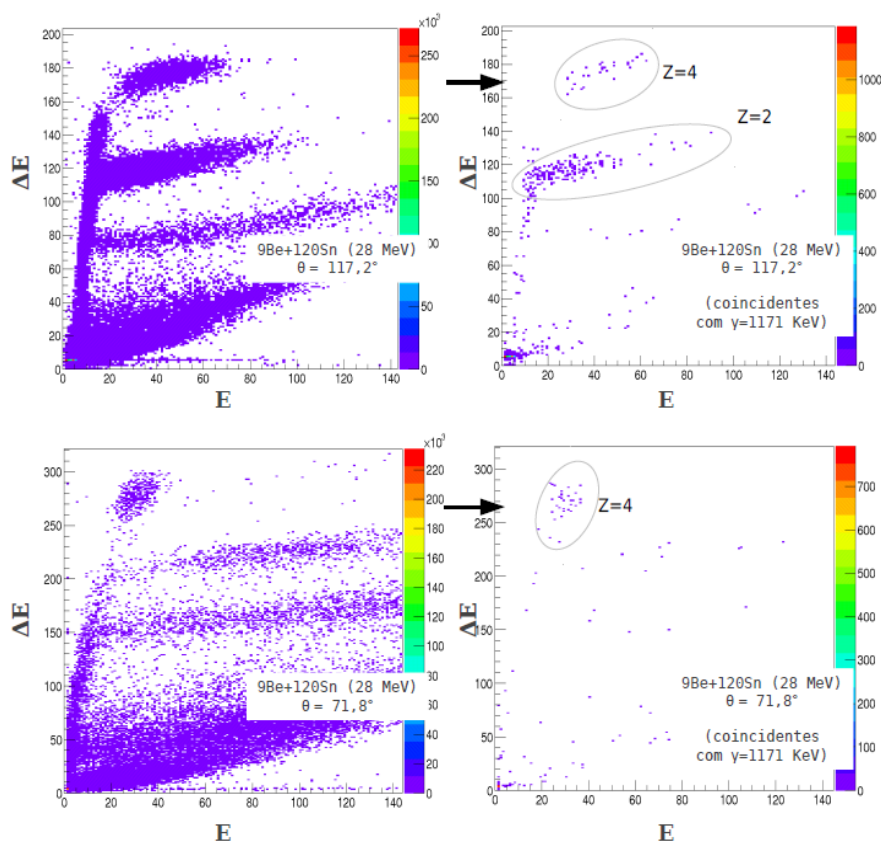


Figura 3: Espectros biparamétricos para dois detectores de partículas, um dianteiro ($\theta_{CM} = 71.8^\circ$) e outro traseiro ($\theta_{CM} = 117.2^\circ$). Para cada um deles, é mostrado o espectro geral a esquerda e o espectro a direita dos eventos coincidentes com a transição entre os estados $2^+ \rightarrow 0^+$ do ${}^{120}\text{Sn}$ ($E_\gamma = 1171$ keV). Nos destaques circulados, a incidência de partículas detectadas com $Z=4$ e/ou $Z=2$.

Um novo colimador foi também desenvolvido e já utilizado na experiência ${}^7\text{Li}+{}^{120}\text{Sn}$ e demonstrou-se útil para a obtenção de distribuições angulares.

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).
- [9] 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.