

**LABORATÓRIO ABERTO  
DE FÍSICA NUCLEAR**

N°

**Proposta de Experimento**

**Período :** 1 ano

**Título:** Estudo da produção do feixe de  $^{17}\text{F}$  e medidas em alvo de  $^{58}\text{Ni}$  e  $^{197}\text{Au}$ .

**Responsável:** Osvaldo Camargo Botelho dos Santos

**e-mail:** osvaldo.santos@usp.br

**Participantes:**

O. C. B. Santos, R. Lichtenthäler, K. C. C. Pires, J. R. B. Oliveira, A. Lépine-Szily  
U. Umbelino, A. S. Serra, B. P. Monteiro, H. F. G. Arruda, D. A. Santana,  
K. Albuquerque, G. S. Gonçalves, H. A. C. Teixeira, M. V. R. Ribeiro, I. R. Silva

**Porta Voz:** Osvaldo Camargo Botelho dos Santos

**e-mail:** [osvaldo.santos@usp.br](mailto:osvaldo.santos@usp.br)

**Número de dias solicitados:** 10

**Datas preferidas:** Março/Abril/2024

**Datas realmente impossíveis:**

**Canalização:** 45-B

<b>Feixe</b>	<b>Est. Carga</b>	<b>I<sub>mínima</sub> (feixe primario)</b>	<b>V<sub>min</sub></b>	<b>V<sub>max</sub></b>	<b>Pulsado?</b>
$^{16}\text{O}$	6+	500 nA	7.5	8	

**Alvos:**  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$   $^{58}\text{Ni}$  e  $^{197}\text{Au}$

**Pastilhas:**

**Características de Feixe Pulsado:**

**Continuação da Experiência já Aprovada N°:**

**Outras informações:**

---

## Resumo

A proposta tem como objetivo verificar a viabilidade de produzir o feixe de  $^{17}\text{F}$  utilizando o sistema *Radioactive Ion Beams in Brasil* (RIBRAS) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP). Além disso, pretende-se realizar medidas com o feixe de  $^{17}\text{F}$  em alvos de  $^{58}\text{Ni}$  e  $^{197}\text{Au}$ . O principal objetivo dessas medidas é obter informações sobre o espalhamento elástico envolvendo, assim como a excitação do  $^{17}\text{F}$  para o seu primeiro estado excitado, utilizando a técnica de coincidência partícula-gama.

## 1 Introdução

O estudo de reações nucleares envolvendo núcleos radioativos/exóticos tem sido tema de grande importância para a física nuclear nas últimas décadas [1–4]. Alguns núcleos afastados da linha de estabilidade podem apresentar características excêntricas, como halo de prótons e nêutrons e pele de nêutrons [5], além de mudanças nos números mágicos [6]. Devido a essas características, esses núcleos são classificados como exóticos. Além disso, eles exibem configurações de *cluster* acentuadas e valores elevados de seção de choque total de reação. Portanto, são núcleos interessantes de serem estudados, uma vez que a abertura de canais de reação durante a colisão com alvos estáveis revela informações valiosas que desafiam nossa compreensão.

Na região de baixas energias, existe um forte acoplamento de canais de reação que pode afetar de maneira significativa o espalhamento elástico [7]. Medir esses canais de reação é muito interessante para compreender a dinâmica de reação. Além disso, os modelos teóricos foram desenvolvidos considerando os núcleos estáveis, tornando-se extremamente relevante verificar a aplicabilidade desses modelos em núcleos exóticos.

Outro ponto crucial a ser destacado é a relevância dos núcleos exóticos/instáveis na nucleossíntese estelar. Compreender os mecanismos de reação desses núcleos desempenha um papel fundamental, uma vez que tais informações são ingredientes essenciais em modelos astrofísicos. Essa compreensão torna-se crucial para entender o papel desses núcleos na formação dos elementos químicos em estrelas.

No Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), núcleos exóticos podem ser produzidos pelo sistema RIBRAS [8–10], que opera em conjunto com o acelerador Pelletron. Esse sistema, composto por dois solenoides supercondutores e três câmaras de espalhamento, é capaz de produzir feixes secundários através de reações de trocas de núcleons pelo método em vóo, com intensidades que variam entre  $10^4$  e  $10^6$  partículas por segundo.

## 2 Objetivos

Pretendemos estudar a viabilidade de produzir feixe  $^{17}\text{F}$ . Esse feixe é interessante, pelo fato de se encontrar fora do vale de estabilidade e apresentar excesso de prótons em relação aos nêutrons. Além disso, o  $^{17}\text{F}$  desempenha um papel significativo na síntese de elementos em estrelas, especialmente no ciclo CNO quente [11]. Uma característica única do  $^{17}\text{F}$  é a presença de um halo de prótons em seu primeiro estado excitado ligado ( $1^{st}$ ;  $E_x = 495$  keV), com estrutura  $p+^{16}\text{O}$ , uma energia de ligação de apenas 100 keV e momento angular zero. Essas características são a assinatura de um halo de prótons. Nosso objetivo é realizar medidas de espalhamento elástico e de excitação do  $^{17}\text{F}$  através da colisão com alvos de  $^{58}\text{Ni}$  e  $^{197}\text{Au}$ .

## 3 Materiais e Métodos

Para realizar as medidas propostas, iremos empregar o sistema RIBRAS (*Radioactive Ion Beams in Brasil*), que é responsável pela produção, seleção e focalização de feixes radioativos. A produção do feixe de  $^{17}\text{F}$  pode ser realizada utilizando dois tipos de alvos:  $^3\text{He}$  e  $^2\text{H}$ , por meio das seguintes reações de produção:

- $^2\text{H}(^{16}\text{O}, ^{17}\text{F})$ , cujo  $Q_{\text{gs}} = -1.6236$  MeV.
- $^3\text{He}(^{16}\text{O}, ^{17}\text{F})$ , cujo  $Q_{\text{gs}} = -4.89252$  MeV.

O sistema RIBRAS possui um sistema de alvo gasoso para a produção de feixes, e também o gás de  $^3\text{He}$ . No entanto, para expandir as possibilidades de produção de feixes radioativos e viabilizar as medidas propostas, planejamos adquirir o gás de  $^2\text{H}$ , o qual atualmente não está disponível no laboratório.

Visando determinar os estados de carga do feixe primário  $^{16}\text{O}$ , realizamos cálculos utilizando o programa *charge* do pacote UPAK. Esses cálculos indicaram que o estado de carga mais provável é  $q=5$ , com 43% de probabilidade, seguido pelo estado de carga  $q=6$ , com 38% de probabilidade. Considerando a energia do feixe primário, optamos pelo estado de carga  $q=6$  como escolha mais adequada para o nosso experimento.

Além disso, realizamos uma simulação considerando uma tensão de 8 MV no terminal do acelerador Pelletron e um feixe de  $^{16}\text{O}$  com um estado de carga  $q=6$  e energia de 56 MeV. Utilizando a reação de produção  $^2\text{H}(^{16}\text{O},^{17}\text{F})$ , conseguimos produzir o feixe de  $^{17}\text{F}$ . Observamos que o  $^{17}\text{F}$  sai do alvo primário com uma probabilidade de 50% de estar no estado de carga  $q=8$ .

Considerando todas as perdas de energia no alvo primário, estimamos que o feixe de  $^{17}\text{F}$  produzido teria uma energia média de 47,7 MeV.

Na produção do feixe de  $^{17}\text{F}$ , é importante considerar a existência de um limite cinemático de 4,2 graus no ângulo de espalhamento devido ao fato da reação de produção ser em cinemática inversa, em que o feixe é significativamente mais pesado do que o alvo. A faixa angular de aceitação do sistema RIBRAS varia de 3 a 6 graus. Para melhorar a seleção do feixe de  $^{17}\text{F}$ , é possível realizar ajustes sutis na posição do copo de Faraday ou no alvo primário. Esses ajustes têm o objetivo de aumentar o número de partículas selecionadas dentro do ângulo sólido de aceitação do RIBRAS.

Considerando uma pressão de 1 atm no alvo primário do RIBRAS, a espessura correspondente seria de 0,32 mg/cm<sup>2</sup>. Para uma seção de choque de produção estimada em torno de 20 mb/sr, temos uma taxa de produção aproximada de  $I \approx 3 \times 10^{-8}$ . É importante lembrar que o estado de carga mais provável do  $^{17}\text{F}$  possui uma probabilidade de aproximadamente 50%, portanto a produção final seria de aproximadamente  $I \approx 1,5 \times 10^{-8}$ , considerando essa probabilidade. Esses valores estão dentro da faixa de produção normalmente alcançada pelo RIBRAS. No entanto, medidas experimentais da reação de produção  $d(^{16}\text{O},^{17}\text{F})n_1$  indicam que a seção de choque de produção pode ser ainda maior, atingindo valores de 60 mb/sr ou até mais elevados [12,13], o que resultaria em um aumento considerável na taxa de produção de  $^{17}\text{F}$ . Nesse caso, espera-se uma produção da ordem de  $10^{4-5}$  partículas por segundo (pps) de  $^{17}\text{F}$ .

Considerando um alvo secundário de  $^{197}\text{Au}$  com uma espessura de 2 mg/cm<sup>2</sup>, realizamos uma simulação do espalhamento do feixe de  $^{17}\text{F}$  e sua detecção em um sistema de telescópios posicionado a 15°. Na simulação, utilizamos um detector  $\Delta E$  fino com uma espessura de 20  $\mu\text{m}$ . Os resultados indicaram que as partículas do feixe de  $^{17}\text{F}$  atravessam o detector fino, depositando aproximadamente 35 MeV de energia, enquanto a energia total das partículas é de aproximadamente 45 MeV. Esses resultados permitem que a identificação do feixe seja realizada por meio de um telescópio  $E - \Delta E$  em ângulos dianteiros.

Para medir a excitação Coulombiana do núcleo  $^{17}\text{F}$ , estamos planejando realizar medidas em coincidência entre partículas e raios- $\gamma$ . Para esse propósito, utilizaremos detectores de barreira de superfície de Silício para detectar o  $^{17}\text{F}$  e detectores LYSO para detectar os raios- $\gamma$ . O Prof. José Roberto Brandão de Oliveira está desenvolvendo uma montagem experimental chamada “Nossa Caixa”, que possui capacidade para acomodar até 108 detectores LYSO. Essa montagem experimental foi projetada com dimensões ideais para ser instalada na câmara central do RIBRAS.

Nessas medidas, planejamos a utilização de um telescópio em ângulo dianteiro com um ângulo aproximado de  $\theta \approx 15^\circ$ , juntamente com detectores de silício individuais (*singles*) posicionados em ângulos mais traseiros. A utilização apenas de telescópios não é possível, pois as partículas de  $^{17}\text{F}$  param no detector fino em ângulos mais traseiros.

Com base na geometria da montagem experimental “Nossa Caixa” de detectores gama, pretendemos cobrir uma região angular que varia aproximadamente de  $\theta \approx 15^\circ$  a  $\theta \approx 40^\circ$ .

## 4 Solicitação

Estamos propondo a produção do feixe de  $^{17}\text{F}$  utilizando o sistema RIBRAS na linha 45B do Pelletron. O feixe primário consiste em  $^{16}\text{O}$ , produzido pelo Pelletron, com uma intensidade mínima de 500 nAe e energia de 56 MeV. O feixe secundário de  $^{17}\text{F}$  será produzido por meio das reações  $^2\text{H}(^{16}\text{O}, ^{17}\text{F})$  ou  $^3\text{He}(^{16}\text{O}, ^{17}\text{F})$ . As tensões de terminal do Pelletron estarão na faixa de 8 MV. **Estima-se que um período de 10 dias de máquina seja suficiente para realizar os testes e as medidas propostas.** A complexidade do projeto está relacionada ao alvo primário a ser utilizado. Embora seja possível utilizar o  $^3\text{He}$  como alvo primário, estamos considerando a opção de usar o  $^2\text{H}$ . Os primeiros testes podem ser iniciados com o alvo de  $^3\text{He}$ , em conjunto com o experimento proposto por Uiran Umbelino envolvendo  $^8\text{B}$ , que também utiliza o mesmo alvo primário.

## Referências

- [1] O. C. B. Santos, R. Lichtenthäler, K. C. C. Pires, and et al, “One-neutron stripping from  $^8\text{Li}$  projectiles to  $^9\text{Be}$  target nuclei,” *E. P. J. A.*, vol. 59, 2023.
- [2] P. N. de Faria, R. Lichtenthäler, K. C. C. Pires, and et al, “Elastic scattering and total reaction cross section of  $^6\text{He} + ^{120}\text{Sn}$ ,” *Phys. Rev. C*, vol. 81, p. 044605, Apr 2010.
- [3] K. C. C. Pires, R. Lichtenthäler, A. Lépine-Szily, and V. Morcelle, “Total reaction cross section for the  $^6\text{He} + ^9\text{Be}$  system,” *Phys. Rev. C*, vol. 90, p. 027605, Aug 2014.
- [4] K. C. C. Pires, R. Lichtenthäler, A. Lépine-Szily, and et al, “Experimental study of  $^6\text{He} + ^9\text{Be}$  elastic scattering at low energies,” *Phys. Rev. C*, vol. 83, p. 064603, Jun 2011.
- [5] I. Tanihata, H. Hamagaki, O. Hashimoto, and et al, “Measurements of interaction cross sections and nuclear radii in the light  $p$ -shell region,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 55, pp. 2676–2679, Dec 1985.
- [6] O. Sorlin and M.-G. Porquet, “Nuclear magic numbers: New features far from stability,” *Progress in Particle and Nuclear Physics*, vol. 61, no. 2, pp. 602–673, 2008.
- [7] O. C. B. Santos, R. Lichtenthäler, K. C. C. Pires, and et al, “Evidence of the effect of strong stripping channels on the dynamics of the  $^8\text{Li} + ^{58}\text{Ni}$  reaction,” *P. R. C*, vol. 103, p. 064601, 2021.
- [8] R. Lichtenthäler, A. Lépine-Szily, V. Guimarães, and et al, “Radioactive Ion Beams in Brazil (RIBRAS),” *Eur. Phys. J. A.*, vol. 25, pp. 733–736, 2005.
- [9] R. Lichtenthäler, M. A. G. Alvarez, A. Lépine-Szily, and et al, “RIBRAS: The Facility for Exotic Nuclei in Brazil,” *Few-Body Systems*, vol. 57, pp. 157–163, 2016.
- [10] R. Lichtenthäler, O. C. B. Santos, A. Serra, and et al, “Experiments with  $A = 6-8$  exotic beams in RIBRAS,” *Eur. Phys. J. A*, vol. 57, p. 92, 2021.
- [11] D. W. Bardayan and M. S. Smith, “Expressions for the  $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$  and  $^{17}\text{F}(p, \gamma)^{18}\text{Ne}$  astrophysical reaction rates,” *Phys. Rev. C*, vol. 56, pp. 1647–1650, Sep 1997.
- [12] M. Assunção, R. Lichtenthäler, V. Guimarães, and et al, “Higher order effects in the  $^{16}\text{O}(d, p)^{17}\text{O}$  and  $^{16}\text{O}(d, n)^{17}\text{F}$  transfer reactions,” *Phys. Rev. C*, vol. 70, p. 054601, Nov 2004.
- [13] C. J. Oliver and et al., “Spectroscopic factors derived from  $^{16}\text{O}(d, n)^{17}\text{F}$  measurements.” *Nucl. Phys. A*, vol. 127, p. 567, Feb 1969.