

LABORATÓRIO ABERTO DE FÍSICA NUCLEAR PAC 2016

Proposal	N°
Title: Medidas de reações induzidas por feixe radioativo de ^{10}Be em prótons de interesse para astrofísica.	
Responsable: Valdir Guimaraes (USP)	E-mail: valdirg@if.usp.br
Participants: Juan Carlos Zamora, F. Hammache (IPN-Orsay-França), N. De Sereville (IPN-Orsay-França), Djalma Mendes Jr. (UFF), Roberto Linares (UFF), Ernesto Silvio Rossi Junior (UNIFIEO), Viviane Morcelle (UFRRJ), Alessandro Lara (IFUSP), Valdir Scarduelli (IFUSP), Edilson Crema (IFUSP), Kelly C. C. Pires (IFUSP), Gayane Karapetyan (IFUSP), Juan Alcantara-Nunez (IFUSP), Marlete Assunção (UNIFESP), Uiran da Silva (IFUSP), Davi da Silva Monteiro (UNILA), Andres Arazi (Tandar-Argentina).	
Spokeperson: Valdir Guimarães	e-mail: valdirg@if.usp.br
Telephone: 3091-7104	Skype:
Number of days for experiment:	15 dias
Period planned for the experiment (are the setup ready for beam time?): Janeiro a Abril 2017. O setup está pronto para essa experiência	

Technical information

Ion source			Accelerator			Experimental Area	
Beam	Cathode	$I_{\text{mínima}}$	V_{min}	V_{max}	Bunched beam?	Beam line	Target
10B		500 nA	6.0	8.0	não	45-B	9Be
							^{197}Au
							^{58}Ni
11B		500 nA	6.0	8.0	não	45-B	

Other relevant/needed information:

O feixe primário de 11B ou 10B deve ter no mínimo 200 nA no alvo de produção na canalização RIBRAS (45B) para viabilizar essas medidas.

Medidas de reações induzidas por feixe radioativo de ^{10}Be em prótons de interesse para astrofísica

Valdir Guimarães¹⁾, Juan Carlos Zamora, F. Hammache²⁾, N. De Sereville²⁾, Viviane Morcelle³⁾, Alessandro Lara¹⁾, Valdir Scarduelli¹⁾, Edilson Crema¹⁾, Kelly C. C. Pires¹⁾, Gayane Karapetyan¹⁾, Juan Alcantara-Nunez¹⁾, Marlete Assunção⁴⁾, Djalma Mendes Junior⁵⁾, Roberto Linares⁵⁾, Davi da Silva Monteiro⁶⁾, Andres Arazi⁷⁾, Ernesto Silvio Rossi Junior⁸⁾.

- 1) Instituto de Física da USP - São Paulo - SP
- 2) IPN - Institute Physique Nucleaire - Orsay - França.
- 3) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - RJ
- 4) Universidade Federal de São Paulo- UNIFESP - Diadema - São Paulo.
- 5) Universidade Federal Fluminense (UFF) - Niterói - RJ
- 6) Universidade de Integração Latino Americana (UNILA) - Fóz do Iguazu - PR.
- 7) Laboratório Tandem - Argentina.
- 8) Centro Universitário FIEO (UNIFIEO) - Osasco - SP.

Motivação científica

Cenários astrofísicos como o universo primordial, estrelas ou explosões de supernovas são meios pelos quais podemos explicar a origem e síntese dos elementos químicos. Nesses sistemas, as reações de captura de prótons, nêutrons ou alfas, mesmo transferência de núcleons, determinam a produção e abundâncias isotópicas na natureza. O estudo dessas reações nucleares faz parte do que chamamos astrofísica nuclear e o processo de formação dos elementos é chamado de nucleossíntese. A investigação de reações nucleares de interesse para astrofísica é um campo bastante ativo da física nuclear e tem se desenvolvido com a utilização de feixes radioativos.

Em particular, o modelo de nucleossíntese primordial ou BBN (Big Bang Nucleosynthesis) foi desenvolvido para que explique a síntese dos elementos leves como ^2H , ^3He , ^4He e ^7Li os quais são fundamentais para entender a abundância pre-galáctica, e que a sua vez tem importantes implicações na evolução estelar das primeiras estruturas do universo. Porém, esse modelo não prevê corretamente a abundância do ^7Li com relação as observações. Modelos alternativos ao BBN estão sendo propostos e uma dessas tentativas é o BBN não-homogêneo, onde é proposto que tenham sido geradas regiões de alta densidade de núcleos ricos e deficientes em nêutrons com a presença de núcleos radioativos de ^7Be , ^8Li e ^8B . Uma análise recente da importância de reações com elementos radioativos leves para o modelo de BBN foi feita por A. Coc et al. [1,2]. Nesse trabalho, o autor considerou uma malha de 400 reações com as respectivas correlações, onde elementos do ciclo CNO como Carbono, Oxigênio e Flúor, foram também considerados. A

Fig. 1 mostra a malha de reações considerada na Ref. [2], onde se caracterizam novos possíveis caminhos para o ciclo CNO (linhas vermelhas).

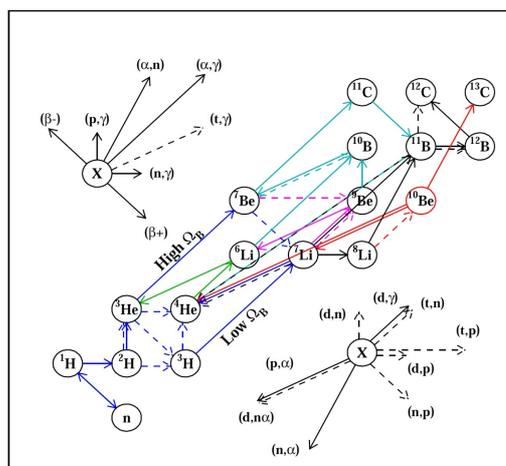


Fig. 1. Malha de reações nucleares considerada para BBN não-homogêneo. Em vermelho se apresenta um novo caminho para o ciclo CNO. Figura adaptada da Ref. [2].

Na análise de sensibilidade, várias reações envolvendo núcleos radioativos se mostraram importantes, entre elas várias reações do ciclo CNO. Esses cálculos foram baseados em extrapolações e previsões teóricas para a grande maioria de reações envolvendo núcleos radioativos. A conclusão foi que, com base nessas informações, ainda não é possível encontrar uma solução para a discrepância das abundâncias do ${}^7\text{Li}$, justificando ainda a necessidade de um esforço tanto experimental quanto teórico para se entender o problema. Esse trabalho, no entanto, mostrou que reações envolvendo o núcleo ${}^{10}\text{Be}$ seriam importantes para o possível ciclo CNO no universo primordial. Nesse projeto estamos propondo investigar reações induzidas pelo núcleo radioativo ${}^{10}\text{Be}$ em alvo de prótons para entender a produção primária dos elementos leves, e especialmente verificar a importância do ciclo CNO no universo primordial.

Experiência proposta

Estamos propondo nesse projeto investigar o espalhamento ressonante e as reações de transferência induzidas pelo feixe radioativo de ${}^{10}\text{Be}$ em alvo de prótons: ${}^{10}\text{Be}(p,p){}^{10}\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}(p,d){}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}(p,t)2\alpha$ e ${}^{10}\text{Be}(p,\alpha){}^7\text{Li}$. Todas essas reações passam pelas ressonâncias do núcleo composto ${}^{11}\text{B}$. Mediremos primeiramente a função de excitação do espalhamento ressonante no sistema ${}^{10}\text{Be}+p$ para investigarmos as ressonâncias no núcleo composto ${}^{11}\text{B}$ em energia de excitação entre 11.5 MeV até 14 MeV, correspondente a uma energia incidente do ${}^{10}\text{Be}$ de $E_{\text{cm}} = 0.5$ a 3.0 MeV. A seguir mediremos as reações (p,d), (p,t) e (p, α). Vamos utilizar o método do alvo grosso utilizando um alvo de prótons de polietileno ($[\text{CH}_2]_n$) de 15 μm de espessura. O feixe radioativo ${}^{10}\text{Be}$ será produzido pelo sistema RIBRAS, no laboratório Pelletron (IFUSP). O feixe secundário de ${}^{10}\text{Be}$ foi produzido anteriormente por meio da reação ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, {}^{10}\text{Be})$ com uma intensidade da ordem de 2×10^3 pps para 0.2 μA de feixe primário [3], esperamos obter um pouco mais

com uma intensidade e transmissão melhor para o feixe primário de ^{11}B . Pretendemos utilizar o segundo solenoide para limpar os contaminantes remanescentes.

Na técnica de medidas com alvo grosso, o feixe de ^{10}Be é freado completamente no alvo mas permite a passagem de partículas mais leves (p , d , t e α) produzidas nas reações de cinemática inversa. Essas partículas emergentes serão detectadas por um arranjo de detectores de silício formando dois telescópios ΔE - E (espessuras de 50 a 100 μm para o detector ΔE e 500 a 1.000 μm para o detector E) montados em ângulos dianteiros no sistema de laboratório (0° e 30°). Isto permitirá selecionarmos os respectivos produtos das reações nucleares em diferentes intervalos de energia no sistema centro de massa. Essas funções de excitação serão analisadas através do formalismo de matriz-R [4,5] que pode fornecer importantes informações (energia, largura e spin) sobre ressonâncias pouco conhecidas nas reações estudadas. Ressonâncias no núcleo composto ^{11}B entre energia de excitação 13.3 e 16.5 MeV foram recentemente investigadas utilizando-se o método do espalhamento ressonante de $^{10}\text{Be}+p$ no laboratório de Lanzhou (China) [6]. Nesse trabalho novas ressonâncias foram observadas. Pretendemos com nossa proposta, cobrir a região de energia de excitação do ^{11}B entre 11.5 e 14.5 MeV, que tem uma relevância maior para a astrofísica. Nossa proposta é ainda fazer um estudo simultâneo de todos os canais de saída, $^{10}\text{Be}(p,p)^{10}\text{Be}$, $^{10}\text{Be}(p,d)^9\text{Be}$, $^{10}\text{Be}(p,t)2\alpha$ e $^{10}\text{Be}(p,\alpha)^7\text{Li}$, para caracterizar completamente essas ressonâncias e verificar suas importâncias relativas em cada uma das reações. Esse tipo de estudo foi recentemente realizado em São Paulo por A. Lepine et al. com o feixe radioativo de ^8Li produzido pelo sistema RIBRAS [7]. Mostramos na Figura- 2 o resultado desse estudo realizado por A. Lepine. Como podemos verificar, as ressonâncias tem importâncias relativas diferentes para cada reação e o estudo simultâneo das reações de saída do sistema $^8\text{Li}+p$ permitiu um melhor estudo das energias, larguras e spins das ressonâncias no núcleo composto ^9Be .

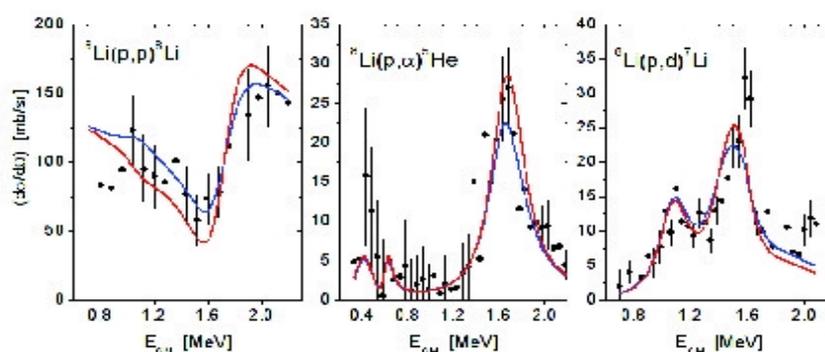


Fig. 2. Função de excitação das reações indicadas mostrando as importâncias relativas das ressonâncias no núcleo composto ^9Be . Figura adaptada da Ref. [7].

O feixe radioativo de ^{10}Be , a ser utilizado nas medidas, deve ser o mais puro possível e vamos utilizar os dois solenoides do sistema RIBRAS para purifica-lo. Os dados a serem obtidos serão analisados pelo pos-doc Juan Carlos Zamora ex-aluno de mestrado do prof. Valdir Guimaraes que está voltando ao Brasil para o pos-doc. A análise teórica das funções de excitação serão realizadas com cálculos de matriz-R. Contaremos também com a colaboração e participação dos pesquisadores F. Hammache e N. De Sereville do IPN-Orsay, França e de pesquisadores de outras instituições no Brasil (UFF, UNIFESP, UNILA, UNIFIEO).

Para estimarmos o tempo de máquina vamos considerar a reação com a menor seção de choque, $^{10}\text{Be}(p,\alpha)^7\text{Li}$, que é da ordem de 100 mb/sr para a energia de excitação 13 a 15 MeV (valor obtido da ref. [6]) e comparar com a reação $^8\text{Li}(p,\alpha)^5\text{He}$ que possui uma seção de choque de 25 mb/sr no pico (see Fig. 2). Pretendemos cobrir a região de energia de excitação entre 11.5 e 14.0 MeV. Foi obtido da ordem de 100 contagens em 24 horas em um bin de energia de 200 KeV para o pico na reação $^8\text{Li}(p,\alpha)^5\text{He}$, com um feixe de ^8Li de 10^5 pps. Para um feixe de ^{10}Be de 2×10^3 pps precisaremos de 12 dias para obter as mesmas 100 contagens em um bin de 200 KeV de energia. Para as outras reações esperamos taxas de contagens melhores. Estamos pedindo 15 dias de máquina para essas medidas. Dois dias serão utilizados para produção do feixe de ^{10}Be onde testaremos as duas possíveis reações, $\text{Be}(^{10}\text{B},^{10}\text{Be})$ $Q=-1.62$ MeV) ou $^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{10}\text{Be})$ $Q=-4.64$ MeV, para identificar qual a que pode fornecer uma intensidade melhor.

Referencias

- [1] A. Coc et al., The Astrophysical Journal 744, 158 (2012).
- [2] A. Coc, J. P. Uzan, and E. Vangioni, Jour. Cosm and Astro Phys. 2014, 050 (2014).
- [3] J. C. Zamora, V. Guimaraes, et al., Phys. Rev. C 84, 034611 (2011).
- [4] A. M. Lane and R. G. Thomas, Rev. Mod. Phys. 30, 257 (1958).
- [5] D. J. Mountford, et al., Phys.Rev. C 85, 022801 (2012).
- [6] Y. D. Liu, et al., Phys. Rev. C 91, 044302 (2015).
- [17] A.Lepine-Szily, R. Lichtenthaler, V. Guimaraes, et al, Journal of Phys: Conf. Series 590, 012012 (2015).

Previous Information on Project

Proposal approved	N E-84-c
Period of beam time (date)	17 a 19 de Setembro 2014
<p>Results or problems:</p> <p>Desenvolvimento de feixes (3 dias). Teste de produção de feixes radioativos de ^{14}C e ^{15}C. Utilizamos as reações $^9\text{Be}(^{13}\text{C},^{14}\text{C})$ $Q=+6.5$ MeV e $^9\text{Be}(^{18}\text{O},^{15}\text{C})$ $Q=+0.7$ MeV para a produção dos feixes ^{14}C e ^{15}C, respectivamente. Detectamos as partículas produzidas na reação a zero graus com intensidades baixas dos feixes primários. Depois, utilizando um alvo de ouro, detectamos as partículas de ^{14}C espalhadas. A reação $^9\text{Be}(^{13}\text{C},^{14}\text{C})$ indicou ser uma boa reação para produzir o feixe radioativo de ^{14}C. Tentamos produzir o feixe radioativo de ^{15}C utilizando a reação $^9\text{Be}(^{18}\text{O},^{15}\text{C})$. No entanto, devido a baixíssima intensidade do feixe primário de ^{18}O não pudemos observar nada. Tínhamos apenas 50 nA do feixe primário de ^{13}C no alvo de produção. Isso é muito pouco para fazermos uma medida. Usando a mesma amostra o pessoal da UFF conseguiu feixes de ^{13}C com intensidades iguais a de um feixe de ^{12}C, indicando que a baixa intensidade do feixe de ^{13}C no Pelletron deve ser um problema da fonte de íons na extração desse material em particular.</p>	
Proposal approved	N E-104b
Period of beam time (date)	22 a 26 de Setembro 2014:
<p>Results or problems:</p> <p>Espalhamento elástico de feixes radioativos.</p> <p>Tentamos mais uma vez fazer medidas da distribuição angular de espalhamento elástico de ^{14}C em alvo de ^{58}Ni e ^{197}Au. Utilizamos a reação $^9\text{Be}(^{13}\text{C},^{14}\text{C})$ $Q=+6.5$ MeV para produzir o feixe de ^{14}C. Não conseguimos realizar medidas de distribuição angular devido a baixa intensidade do feixe primário de ^{13}C. Medimos espalhamento em 20 e 37.5 graus. Utilizamos dois dias para testar produção do feixe radioativo de ^{12}B com a reação $^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{12}\text{B})$ $Q=+1.7$ MeV. A reação $^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{12}\text{B})$ indicou ser uma boa reação para produzir o feixe radioativo de ^{12}B.</p>	

Proposal approved	N E83-c
Period of beam time (date)	6 a 10 de Outubro de 2014
<p>Results or problems:</p> <p>Investigação de espalhamento elástico de ^7Be em alvo gasoso de ^4He. (6 dias)</p> <p>Utilizamos esse período de máquina para testar produção do feixe radioativo de ^{12}B utilizando a reação $^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{12}\text{B}) Q=+1.7$ MeV. Essa reação se mostrou eficiente e pudemos obter uma intensidade da ordem de 10^5 pps para um feixe primário de $1 \mu\text{A}$. Devido a baixa intensidade do feixe primário de ^{11}B não pudemos medir uma distribuição angular de espalhamento.</p>	
Proposal approved	N E-104b
Period of beam time (date)	8 a 12 Dezembro de 2014
<p>Results or problems:</p> <p>Espalhamento elástico de isótopos radioativos leves (6 dias).</p> <p>Utilizamos esse período de máquina para medidas de espalhamento elástico de $^{14}\text{C}+^{197}\text{Au}$ e $^{14}\text{C}+^{58}\text{Ni}$. Produzimos o feixe de ^{14}C utilizando a reação $^9\text{Be}(^{13}\text{C},^{14}\text{C})$. Apesar da baixa intensidade medimos alguns ângulos dianteiros para o espalhamento em ouro e níquel. No entanto, precisamos de uma medida da distribuição angular cobrindo um intervalo angular maior, incluindo medidas em ângulos mais traseiros (até 90 a 100 graus) no laboratório.</p>	

Proposal approved	N E103-b
Period of beam time (date)	Não utilizado
<p>Results or problems:</p> <p>Medida de retro-espalhamento de $8\text{Li}+120\text{Sn}$ (5 dias).</p> <p>5 dias destinado a essa experiência foi muito pouco para essas medidas e decidimos não realizá-la. Para medidas com feixes radioativos são necessários praticamente dois dias para passar o feixe primário, produzir e otimizar o feixe secundário, eliminar ruídos e ajustar os detectores e eletrônica. Além disso, para essa medida em particular precisamos de um feixe primário de no mínimo 400 nA no alvo de produção.</p>	
Proposal approved	N E-112
Period of beam time (date)	Não utilizado
<p>Results or problems:</p> <p>Reação de transferência $9\text{Be}(14\text{C},15\text{C})8\text{Be}$ para estudar reação de captura $14\text{C}(n,g)15\text{C}$</p> <p>Esses dados seriam para uma tese de doutorado. No entanto, a aluna que iria analisar esses dados não passou no exame de ingresso e não se matriculou no doutorado.</p>	