

Projeto de Pesquisa

Estudo da colisão do núcleo ${}^6\text{He}$ com alvos leves em baixas energias

Kelly Cristina Cezaretto Pires
Supervisor: Prof. Dr. Rubens Lichtenthäler Filho
Departamento de Física Nuclear, Instituto de Física da USP

28 de Março de 2011

Resumo

Nos últimos anos, o estudo de núcleos longe da linha de estabilidade beta (núcleos exóticos) tornou-se objeto de grande interesse em parte por constituírem um campo de pesquisa extremamente extenso envolvendo desde núcleos leves, ricos em prótons ou nêutrons, até elementos superpesados. Esses núcleos apresentam situações extremas de energia de ligação e isospin, constituindo um “laboratório” de testes para os modelos nucleares, além de serem importantes na evolução da nucleossíntese primordial e estelar.

Este projeto de pesquisa consiste em investigar a colisão entre o núcleo exótico ${}^6\text{He}$ e alvos leves. Pretendemos medir distribuições angulares de espalhamento elástico, inelástico e de reações (*breakup* do projétil e do alvo), em baixas energias utilizando o sistema RIBRAS da Universidade de São Paulo, que farão parte de uma investigação sistemática envolvendo núcleos exóticos.

1 Introdução

Reações nucleares envolvendo núcleos distantes da linha de estabilidade (núcleos exóticos) constituem uma área de investigação extremamente extensa e pouco explorada. Até o momento, a maioria dos estudos a respeito das propriedades nucleares foram feitos envolvendo núcleos em torno da linha de estabilidade, onde os tempos de vida dos núclídeos são razoavelmente longos. A medida que nos afastamos da linha de estabilidade as meias-vidas decrescem, dificultando o estudo experimental.

São conhecidos cerca de 300 núcleos estáveis, representados pelos quadradinhos negros na carta de núclídeos, mostrada na Figura 1, e mais de 3000 núcleos instáveis, representados pela região em amarelo. A região verde corresponde a núcleos ainda não observados mas previstos pelos diferentes cálculos de massas e energias de ligação nucleares.

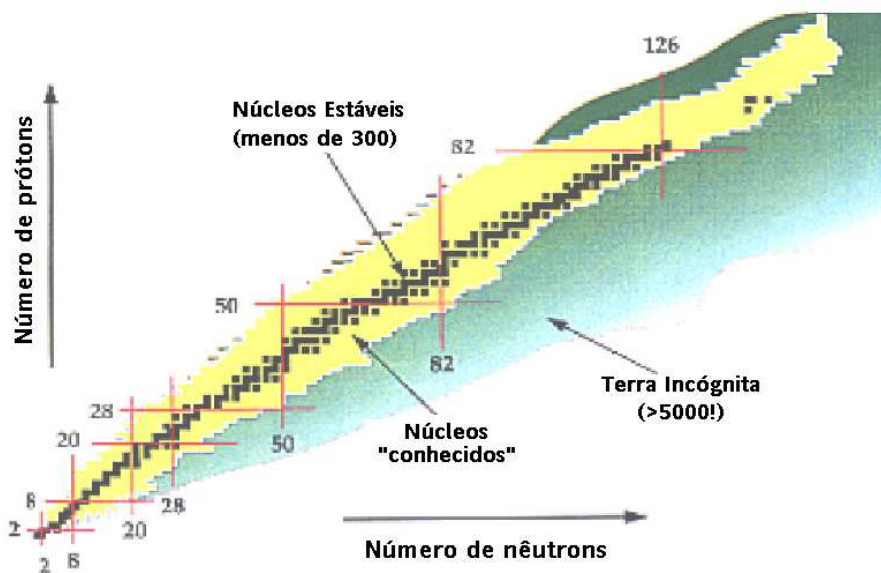


Figura 1: Carta de núclídeos.

Durante a década de 1960 foram realizados os primeiros testes para se

produzir núcleos fora da linha de estabilidade. Essas experiências foram feitas no CERN, utilizando-se feixe de prótons de 600 MeV's e alvos de lantânio e urânio [1]. Somente 20 anos mais tarde, com o advento de aceleradores de íons pesados em energias intermediárias, foram realizadas as primeiras experiências envolvendo núcleos mais leves [2, 3], o que abriu um novo campo de pesquisa para a física nuclear.

A investigação desses núcleos exóticos é de grande interesse por vários motivos, dentre os quais podemos citar: (i) importância na nucleossíntese primordial (elementos leves) e geração de energia em estrelas massivas ($M > 8 M_{SOL}$); (ii) síntese dos elementos mais pesados que o Ferro (*processo - r*); (iii) estudos de simetrias fundamentais que não são encontradas em núcleos estáveis, como por exemplo, núcleos pesados ricos em prótons com $N = Z$; (iv) alterações na estrutura nuclear dos elementos que encontram-se fora da linha de estabilidade como, por exemplo, desaparecimento ou modificação dos números mágicos; (v) possibilidade de estudos envolvendo sistemas de muitos corpos.

Neste contexto, o estudo do núcleo exótico ${}^6\text{He}$ pode ser uma forma de superar o *gap* em $A=5$ para a síntese dos elementos pesados, através da reação: $n+n+{}^4\text{He} \rightarrow {}^6\text{He} \rightarrow \text{elementos mais pesados}$. Além disso, o ${}^6\text{He}$ é um núcleo halo de nêutrons que possui estrutura borromeana, características que o torna muito interessante e nos permite estudar interações de três corpos.

Do ponto de vista experimental, o estudo de núcleos leves fora da linha de estabilidade pode ser realizado utilizando o sistema RIBRAS (*Radioactive Ion Beams in Brasil*) instalado no Laboratório Aberto de Física Nuclear (LAFN) desde 2004 [4]. Esse sistema opera em conjunto com o acelerador Pelletron, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, e possibilita esse estudo em baixas energias ($E \approx 2 - 5 \text{ MeV/A}$).

A Figura 2 mostra os principais laboratórios/instituições de pesquisa que atualmente produzem feixes secundários de núcleos radioativos. Neste ponto cabe ressaltar que a maioria dos laboratórios produzem feixes radioativos em altas energias, o que nos deixa em condições muito favoráveis para estudar problemas de astrofísica nuclear, reações periféricas sensíveis a fenômenos como halo, fusão de núcleos a energias abaixo da barreira coulombiana, entre outros.

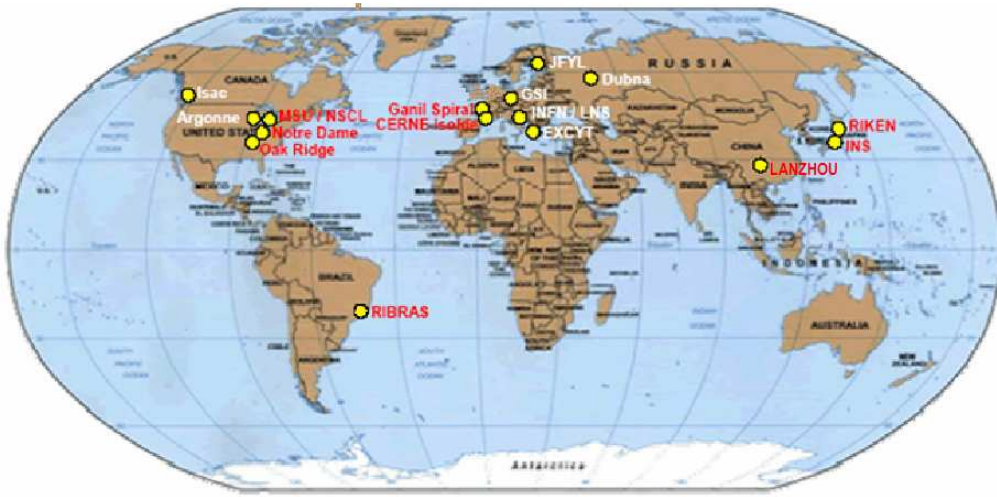


Figura 2: Mapa-múndi mostrando os laboratórios/instituições de pesquisa que atualmente produzem feixes radioativos.

2 Objetivos

Neste projeto propomos estudar a colisão ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ em baixas energias. Além do espalhamento elástico ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ e inelástico ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}^*$, estudaremos os processos envolvendo a produção de partículas alfas, como *breakup*.

A secção de choque total de reação será obtida dos dados de espalhamento elástico e comparada com resultados da literatura, obtidos para diferentes sistemas envolvendo projéteis leves e alvos de massa leve, inter-

mediária e pesada, obtendo uma sistemática como a mostrada na Figura 3 [5].

As medidas poderão ser realizadas a partir de $E_{\text{lab}}^{\text{He}} = 10$ MeV. Uma energia menor que este valor não seria possível utilizar pois o feixe pararia antes de chegar ao detector E, devido as perdas de energia do feixe exótico no alvo e detector ΔE .

Em particular, medidas do sistema ${}^6\text{He} + {}^9\text{Be}$ em energias mais baixas do que as realizadas em meu projeto de doutoramento são muito interessantes pois nos possibilitam, entre outras coisas, estudar mais profundamente os efeitos relacionados às distribuições angulares já que foram observadas oscilações [7]. Através deste estudo, informações a respeito do período destas oscilações poderão ser obtidas.

Vale mencionar que estas medidas em energias bem baixas ($E \approx 2$ MeV/A) não dependem de um ótimo desempenho do acelerador Pelletron, possibilitando o trabalho a baixas tensões do acelerador.

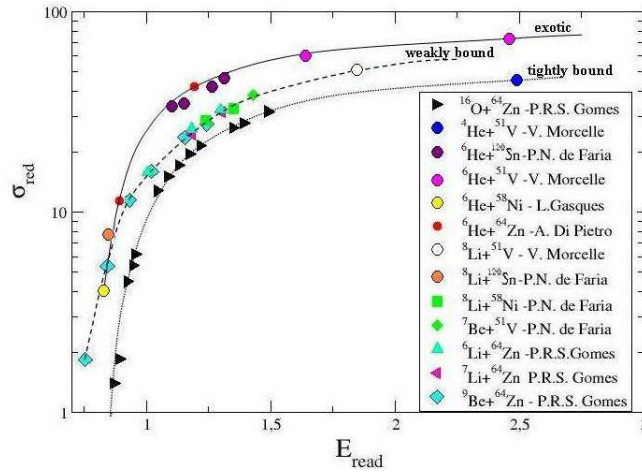


Figura 3: Secção de choque de reação reduzida versus Energia Reduzida para vários sistemas envolvendo alvos de massa intermediária. Figura obtida da Ref. [6].

Os resultados que poderão ser obtidos deste projeto não são de interesse apenas com relação à estrutura do halo de nêutrons do núcleo ${}^6\text{He}$, mas também são de relevância no processo de nucleossíntese estelar. A importância destes estudos na astrofísica nuclear está na determinação de secções de choque de captura que são importantes em modelos de nucleossíntese, como será discutido na Seção 3.1.

Paralelamente, temos a possibilidade de estudar outros sistemas leves, como ${}^7\text{Be}+{}^9\text{Be}$ ou diversificar o alvo utilizando por exemplo, prótons (CH_2), ${}^7\text{Li}$, ${}^{10,11}\text{B}$ ou ${}^{12}\text{C}$. A escolha desses alvos é justificada experimentalmente uma vez que são os mais leves possíveis que possibilitam as medidas envolvendo os feixes exóticos aqui propostas.

3 Plano de Estudo: A colisão de projéteis exóticos e alvos leves.

O espalhamento elástico é o processo mais simples e mais provável que ocorre em colisões nucleares e pode fornecer informações importantes a respeito das propriedades nucleares. Essas informações são obtidas por meio do estudo do potencial de interação (projétil-alvo) que reproduz as secções de choque experimentais. A escolha do potencial e da estrutura desses núcleos é de fundamental importância para a descrição da secção de choque experimental. Os núcleos exóticos são usualmente descritos através de uma configuração de *cluster* de partículas [8]. Por exemplo, o núcleo de ${}^6\text{He}$ pode ser descrito como ${}^4\text{He}+n+n$, ou seja, um caroço de ${}^4\text{He}$ com dois nucleons de valência. Esses nucleons formam uma nuvem com um longo alcance e faz com que o tamanho final desse núcleo seja maior do que os correspondentes isótopos estáveis, tendo portanto, consequências importantes no mecanismo

de reação.

Uma outra característica desses núcleos exóticos é o fato de serem fracamente ligados, ou seja, o limiar em energia para o decaimento por emissão de partículas é muito próximo ao estado fundamental. Nesse caso, a probabilidade de quebra é grande, o que favorece o acoplamento para estados do contínuo. Assim, através das medidas aqui propostas, investigaremos os efeitos de quebra (*breakup*) do projétil e do alvo.

Quando se utiliza alvos pesados, o processo de quebra nuclear e coulombiana estão presentes, porém no caso de alvos leves o campo coulombiano se torna menor e o processo de quebra nuclear é dominante. Além disso, o núcleo de ${}^6\text{He}$ é um sistema de três corpos e necessita de três partículas ($\alpha+n+n$) para ser ligado. Desta forma, estudos com o núcleo exótico ${}^6\text{He}$ permitem a inclusão de forças de três corpos na matéria nuclear. Temos trabalhado, em colaboração com o *Prof. Dr. Antonio Moro* e com a *Dr. Manuela Rodríguez-Gallardo* da Universidade de Sevilha, no desenvolvimento de cálculos de 4 corpos no espalhamento ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$.

3.1 Interesse Astrofísico

Nos últimos anos, têm-se discutido que a fase após o colapso de uma supernova do tipo-II pode oferecer o “cenário ideal” para o *processo-r*, levando a formação de elementos pesados. Aproximadamente metade dos núcleos estáveis observados na natureza na região $A > 56$, são formados através deste processo, que envolve a captura rápida de nêutrons. Esses nêutrons são produzidos principalmente através das reações ${}^{13}\text{C}(\alpha,n)$ e ${}^{22}\text{Ne}(\alpha,n)$, envolvendo os núcleos ${}^{13}\text{C}$ e ${}^{22}\text{Ne}$. Portanto, é necessário superar os gaps de massas $A=5$ e $A=8$, que representam uma barreira na síntese de elementos pesados. Para tal, as reações ${}^4\text{He}(2n,\gamma){}^6\text{He}$ e ${}^6\text{He}(2n,\gamma){}^8\text{He}$, que envolve a

captura de dois nêutrons, são consideradas potencialmente relevantes. Taxas precisas de reações nucleares são necessárias para uma detalhada descrição da produção de elementos na nucleossíntese primordial.

Atualmente acredita-se que o processo $(\alpha n, \gamma)$ em supernovas do tipo-II é mais importante do que o processo de captura de dois nêutrons. Porém no caso da produção de elementos através do *processo-r* a relevância do processo de captura de dois nêutrons ainda está sendo investigada e, sem dúvida, é interessante verificar experimentalmente esta hipótese [9].

Medidas da captura ${}^4\text{He}+n+n$ não podem ser realizadas diretamente. Por outro lado, as medidas da colisão ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ realizadas em meu doutoramento [7], mostram que a quebra do projétil ${}^6\text{He}$ em ${}^4\text{He}+n+n$ (*breakup*) é um processo importante na dinâmica da reação e afeta de forma significativa o espalhamento elástico. A medida proposta neste projeto nos possibilita obter informações da secção de choque de *breakup* do núcleo ${}^6\text{He}$ e conseqüentemente da secção de choque de captura ${}^4\text{He}+n+n$ de interesse astrofísico, já que estas quantidades são diretamente proporcionais. Ou seja, a medida proposta aqui é exatamente o processo inverso da captura mencionada anteriormente.

O avanço dos estudos em astrofísica nuclear estão focalizados nas extremidades opostas da escala da energia de reações nucleares: energias muito altas e muito baixas. Projéteis com energias de bombardeamento elevadas produzem matéria nuclear em altas densidades e temperaturas (plasma do quark-gluon). No extremo oposto da escala de energia estão as reações de baixa energia, de importância para a evolução estelar. As reações relevantes são extremamente difíceis de se medir diretamente no laboratório devido às baixas energias astrofísicas e por isso a utilização de medidas indiretas.

Podemos obter informações a respeito da secção de choque de captura

não ressonante a partir da secção de choque de dissociação radioativa tipo E1, que pode ser obtida medindo-se a quebra do núcleo ${}^6\text{He}$ em alvos pesados. Neste caso tem-se a contribuição do campo coulombiano de longo alcance (*breakup* coulombiano) e do campo nuclear (*breakup* nuclear). Como estes processos interferem coerentemente, é difícil separar a quebra coulombiana da nuclear.

No caso da utilização de alvos leves, o processo de quebra nuclear torna-se mais importante do que a contribuição do processo coulombiano, que pode ser desprezada. Neste caso informações sobre a dissociação E2, que é muito importante na astrofísica, podem ser obtidas. Desta forma, medidas envolvendo alvos leves fornecem informações a respeito da contribuição da quebra nuclear que, através de processos de *scaling*, pode ser removida de dados envolvendo alvos pesados [10].

Através das medidas propostas neste projeto, poderemos obter informações a respeito do valor da probabilidade de transição reduzida quadrupolar elétrica $B(E2)$ que é importante por fornecer informações a respeito da probabilidade de transição entre dois níveis. Tal probabilidade depende fortemente da função de onda e por isso representa um excelente teste para os modelos nucleares, visto que alguns modelos prevêm bem as energias dos estados, porém não são capazes de determinar as funções de onda com precisão.

Além disso, o estudo proposto, em baixas energias, é interessante pois fornece informações a respeito do potencial de interação. O conhecimento do potencial de interação em energias astrofísicas é interessante pelo fato de fornecer informações a respeito da secção de choque de fusão do núcleo ${}^6\text{He}$. Em muitos casos não é possível a realização de medidas na região de energia de interesse astrofísico e o que se faz é determinar o potencial

numa região de energia mais alta e então extrapolá-lo para a região de energia mais baixa. Estas informações podem ser úteis em cálculos de taxas de produção em modelos de nucleossíntese [11]. Neste sentido, medidas do espalhamento elástico ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ em energias mais baixas do que as realizadas até o momento [12, 13] são importantes.

Por outro lado, vários estudos estão sendo realizados com o objetivo de se obter um potencial global para o espalhamento envolvendo partículas alfa, que é o caroço do núcleo ${}^6\text{He}$ [14, 15]. Para sistemas envolvendo alvos pesados, como ${}^{120}\text{Sn}$, podemos citar o trabalho de *P.N. de Faria et al.* [5], onde foi realizada uma comparação entre os dados experimentais obtidos para ${}^6\text{He}+{}^{120}\text{Sn}$ e ${}^4\text{He}+{}^{120}\text{Sn}$, que permitiu observar o efeito relacionado ao halo de 2 nêutrons do núcleo ${}^6\text{He}$. No sistema RIBRAS isso é facilmente obtido pois em qualquer medida temos o feixe secundário de ${}^4\text{He}$ presente nos espectros biparamétricos como contaminante. Assim, torna-se possível obter distribuições angulares para ${}^6\text{He}+\text{ALVO}$ e ${}^4\text{He}+\text{ALVO}$, simultaneamente. As medidas envolvendo o sistema ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ permite estender este estudo do potencial global para alvos leves onde a contribuição nuclear é dominante. Porém, para a realização deste estudo é de fundamental importância uma análise em função da energia do sistema, e este é um dos motivos pelo qual as medidas propostas neste projeto envolvem outras energias.

4 Materiais e Métodos

Utilizaremos o sistema RIBRAS para seleção e focalização dos feixes radioativos. Uma foto e um esquema desse sistema são mostrados na Figura 4.

Para a produção do feixe exótico de ${}^6\text{He}$ utilizaremos ${}^9\text{Be}({}^7\text{Li}, {}^6\text{He})$ como reação de produção. Tendo a oportunidade de realizar medidas do espalhamento ${}^7\text{Be}+{}^9\text{Be}$, poderemos utilizar ${}^3\text{He}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be})$ como reação de produção

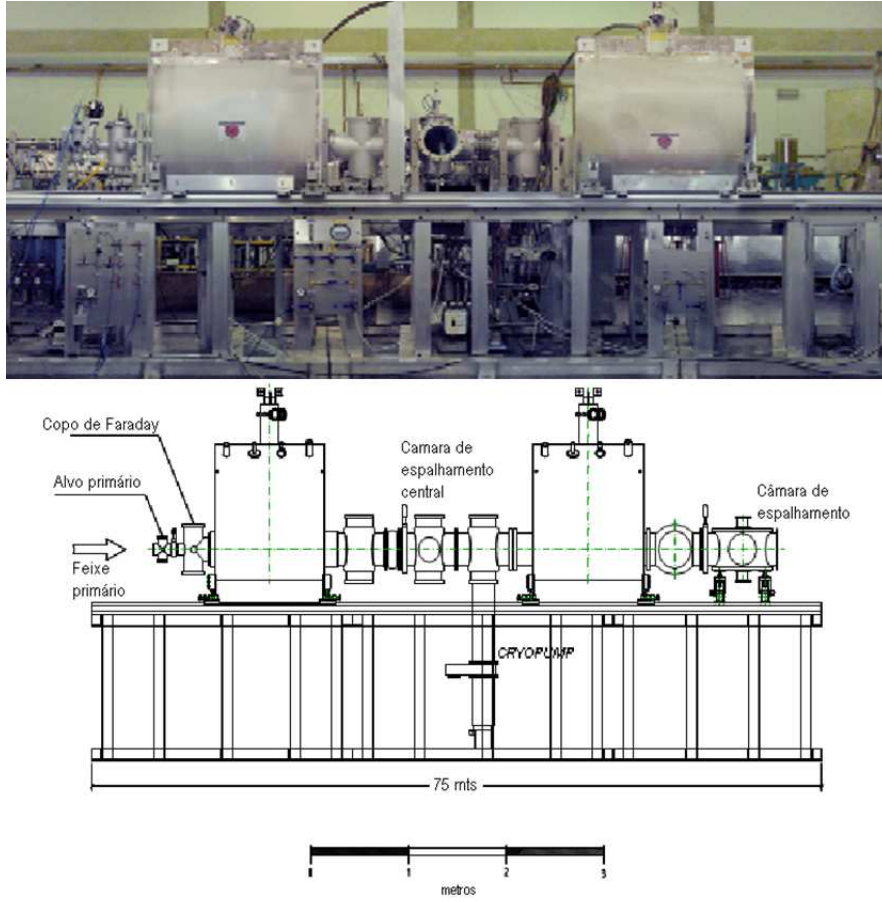


Figura 4: Foto do estágio atual e esquema inicial do sistema de duplo solenóides, instalado na linha 45B no Laboratório Pelletron da Universidade de São Paulo.

porém, temos a intenção de testar a produção do núcleo de ${}^7\text{Be}$ utilizando uma nova reação de produção: ${}^{12}\text{C}({}^6\text{Li}, {}^7\text{Be})$. A fonte de íons SNICS Multicatodo do Laboratório Pelletron produz feixes de ${}^{6,7}\text{Li}$ de intensidade de alguns microampères.

No alvo primário, localizado antes do primeiro solenóide, ocorrem as reações nucleares que geram os feixes de interesse. Após o alvo primário há um copo de Faraday que intercepta as partículas entre $0 < \theta < 2$ graus, parando e medindo a intensidade do feixe primário. As partículas secundárias, produzidas através de reações nucleares no alvo primário, que

saírem nesta região angular, também serão paradas. No entanto aquelas que saírem com ângulos de espalhamento entre 2 e 6 graus atravessarão o solenóide, que faz uma seleção pela rigidez magnética. Esse ângulo de aceitação é definido pelo copo de Faraday (limite inferior) e por um colimador circular (limite superior). O campo magnético B produzido pelo solenóide atua sobre os íons de massa m , estado de carga q e velocidade v segundo sua rigidez magnética dada por:

$$B\rho = \frac{mv}{q} = \frac{\sqrt{2mE}}{q} \quad (1)$$

onde ρ é o raio de curvatura da trajetória e E é a energia do íon emergente do alvo primário. Ou seja, as partículas são focalizadas em diferentes posições ao longo do eixo z (feixe) de acordo com sua rigidez magnética. Contudo, é possível que partículas remanescentes do feixe primário, devido a espalhamentos secundários e/ou outros contaminantes, tenham a mesma rigidez magnética que o feixe de interesse e também acabem sendo aceitas pelo solenóide. Desta forma é possível utilizar colimadores, bloqueadores e degradadores (ver Figura 5) em posições estratégicas, de forma a selecionar partículas com um dado $B\rho$ e eliminar parcialmente possíveis contaminantes.

Até o presente momento, o sistema RIBRAS operou somente com o primeiro solenóide porém o segundo solenóide está em fase de testes e deve entrar em operação brevemente.

O sistema de detecção que pretendemos utilizar consiste em telescópios $\Delta E - E$ formados por detectores de barreira de superfície de silício com ΔE de $20\mu m$ e E de $1000\mu m$ de espessura. As partículas carregadas atravessam o primeiro detector ΔE , perdendo parte da sua energia, e param no segundo detector E , perdendo o restante da energia. A perda de energia em ΔE é

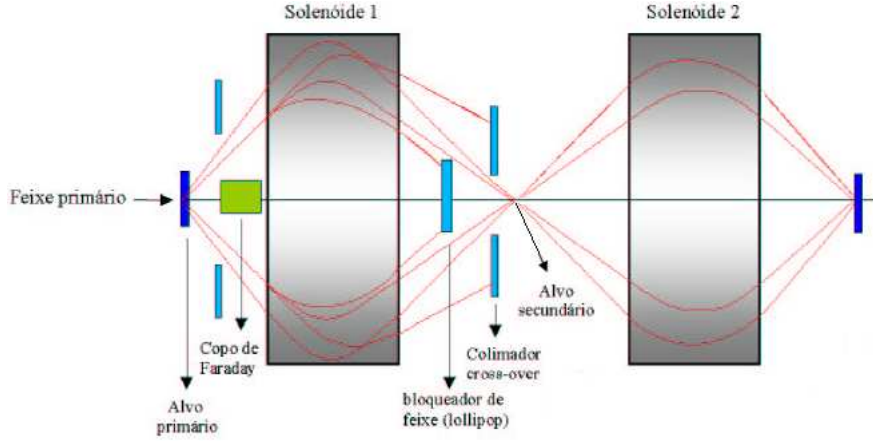


Figura 5: Esquema da focalização de diversos feixes com diferentes rigidez magnética.

proporcional a mZ^2/E , sendo Z o número atômico da partícula detectada, m sua massa e E sua energia. Assim, partículas carregadas com diferentes cargas Z e mesma energia E , sofrerão perdas ΔE , diferentes. Desta forma, medindo-se a energia perdida no primeiro detector em função da energia total E_T ($E_T = \Delta E + E$) das partículas, podemos identificar o número atômico e a massa.

O alvo secundário de ^9Be já está disponível no laboratório Pelletron. Dentre as outras possibilidades citadas para o alvo secundário, o de CH_2 e ^{12}C também já estão disponíveis. Os alvos de ^{11}B e ^7Li são bastante difíceis de se produzir na espessura necessária para serem empregados no sistema RIBRAS ($\approx 2 \text{ mg/cm}^2$), porém já entramos em contato com o *Laboratório de Alvos do Instituto de Física da Universidade de São Paulo* e um grande esforço será feito para confeccioná-los nas espessuras apropriadas. Pretendemos utilizar um absorvedor de ^{64}Cu com aproximadamente 30 mg/cm^2 de espessura, que já está disponível, para diminuir a energia do feixe secundário sem interferir na taxa de produção do mesmo.

O estudo em baixas energias envolvendo núcleos distantes da linha de estabilidade- β tem sido feito quase que exclusivamente utilizando o sistema RIBRAS da Universidade de São Paulo, salvo poucas medidas realizadas nos laboratórios de *Louvain-La-Neuve* na Bélgica [16] e no sistema TWINSOL de Notre Dame nos Estados Unidos [17]. Desta forma uma boa parte das medidas de quebra do ${}^6\text{He}$ encontradas na literatura foram realizadas em energias altas [18, 19], ou seja, o sistema RIBRAS permite medidas em uma região de energia baixa que ainda não foi estudada, onde novos fenômenos poderão ser observados.

4.1 Medidas dos nêutrons da reação ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$

Neste projeto temos a intenção de realizar medidas das partículas alfas em coincidência com os nêutrons produzidos na colisão ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ através do *breakup* do projétil.

O núcleo ${}^6\text{He}$ na configuração $(n+n+{}^4\text{He})$ é ligado apenas por $E_{\text{lig}}=0,973$ MeV, ou seja, acima dessa energia o núcleo ${}^6\text{He}$ se quebra. Como o primeiro estado excitado está em $E_x=1,797$ MeV, todos os estados excitados deste núcleo são não ligados, ou seja, estão no contínuo. O mesmo ocorre para o núcleo ${}^9\text{Be}$ na configuração $(n+{}^4\text{He}+{}^4\text{He})$. Ele é ligado apenas por $E_{\text{lig}}=1,665$ MeV e o primeiro estado excitado está em $E_x=1,684$ MeV. Da mesma forma, todos os estados excitados do núcleo ${}^9\text{Be}$ estão no contínuo. Portanto, é de se esperar uma grande produção de partículas alfas na colisão ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$.

As medidas das partículas alfas são inclusivas pois não temos como saber se são produzidas por um mecanismo de quebra, por um mecanismo de transferência ou fusão. Estas partículas podem ser provenientes de diferentes canais de reação, como, por exemplo, a quebra do projétil ${}^6\text{He}$, a excitação

e a quebra do alvo ${}^9\text{Be}$, a transferência de 2 nêutrons ${}^9\text{Be}({}^6\text{He}, {}^4\text{He}){}^{11}\text{Be}$, a transferência de 1 nêutron, ${}^9\text{Be}({}^6\text{He}, {}^5\text{He}){}^{10}\text{Be}$, na qual o núcleo ${}^5\text{He}$ se quebra em ${}^4\text{He} + n$. Além destes processos diretos, podemos citar a fusão completa ${}^6\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{15}_6\text{C}$ formando o núcleo composto ${}^{15}\text{C}$ que decai emitindo nêutrons, prótons, alfas e gamas.

Com a realização das medidas em coincidência, os processos responsáveis pela quebra poderão ser identificados. Para a realização destas medidas será necessário utilizar um sistema de feixe pulsado, que deverá entrar em operação em breve, e um detector de nêutrons. Este detector está disponível no Laboratório Pelletron e consiste em uma parede de cintiladores líquidos com grande ângulo sólido e que permite medidas em coincidência com eficiência geométrica próxima de 100%. Este detector ainda não está em operação, porém as perspectivas são muito boas e há um técnico de laboratório, *Sr. J. C. Tromba*, trabalhando em sua operação e montagem. Tenho a intenção de colaborar para que este detector entre em operação rapidamente.

Por outro lado, existe a possibilidade de realizar estas medidas utilizando o sistema TWINSOL da Universidade de Notre Dame, em colaboração com o *Prof. Dr. J. Kolata*.

5 Análises

A redução dos dados experimentais será feita utilizando o programa SCAN-ROOT [20]. Será utilizado também o pacote de rotinas VAXPAK [21] que inclui programas para criação de espectros (SCAN), para cálculo de perda de energia (STOPX) e de cinemática (KINEQ), entre outros.

A análise teórica da distribuição angular elástica será feita por cálculos de Modelo Óptico, Canais Acoplados (CC) considerando a excitação do

alvo de ^9Be e Canais Acoplados com Discretização do Contínuo (CDCC – *Continuous Discretized Coupled Channels*) considerando a quebra do projétil ^6He . As distribuições de partículas alfa medidas serão comparadas com os resultados dos cálculos de CDCC para a quebra do projétil ^6He e de CC para a quebra do alvo de ^9Be . Nestes cálculos utilizaremos o código computacional FRESCO [22].

6 Cronograma

A proposta para a realização das medidas envolvidas neste projeto está sendo submetida ao PAC (*Program Advisory Committee*) do Laboratório Pelletron do IFUSP, que deverá ser realizado em abril/2011.

Disposmos de todo material necessário para o início das medidas experimentais, que poderão iniciar-se no segundo semestre de 2011. Essa fase de aquisição de dados deve durar aproximadamente 6 meses e ao mesmo tempo os dados experimentais adquiridos serão analisados. Durante todo o período os cálculos teóricos estarão sendo realizados utilizando o código computacional FRESCO.

7 Justificativa

Este projeto estende o trabalho realizado em meu doutoramento e levará a resultados originais numa área de fronteira de pesquisa e em energias nas quais praticamente não há outros laboratórios atuando. Atualmente, o Grupo de Reações Diretas e Núcleos Exóticos conta com o suporte teórico do grupo do *Prof. Dr. Antonio Moro* e do *Prof. Dr. Joaquín Gómez-Camacho* do Departamento de Física Atômica, Molecular e Nuclear da Universidade de Sevilla, que carrega experiência de mais de 20 anos. Tive a oportunidade

de realizar parte do meu doutorado neste grupo sob a co-orientação do *Prof. Dr. Antonio Moro* durante 8 meses. Neste período obtive conhecimento sobre os cálculos teóricos que serão necessários para a análise dos dados experimentais propostos neste projeto.

O Grupo de Reações Diretas e Núcleos Exóticos foi pioneiro na área de núcleos exóticos no nosso país, trabalhando intensivamente no desenvolvimento de métodos experimentais e de análise de dados, mantendo ao longo dos anos um alto grau de qualidade nos trabalhos desenvolvidos. O grupo é bastante ativo e tem realizado estudos originais na região de baixas energias.

O acelerador Pelletron, que fornece o feixe primário para o sistema RIBRAS, e o único do Brasil dedicado à pesquisa em física nuclear básica. Em particular, o sistema RIBRAS é o único do hemisfério sul capaz de investigar núcleos fora da linha de estabilidade. Portanto, embora seja desejável uma mudança de grupo de investigação para o desenvolvimento do projeto de pós-doutoramento, o grupo de Reações Diretas e Núcleos Exóticos do Instituto de Física da Universidade de São Paulo é o único com infraestrutura capaz de possibilitar a minha continuidade nesta linha de pesquisa.

Por outro lado, a intenção de continuar com o mesmo orientador do mestrado e doutorado está no fato do meu interesse pelo presente projeto. Acredito que resultados muito originais podem ser obtidos. Sempre tive toda liberdade para trocar de orientador, porém diante das perspectivas que se abrem relativas a esse projeto, optei por continuar sob a supervisão do Prof. Rubens.

Atualmente o grupo Grupo de Reações Diretas e Núcleos exóticos tem desenvolvido, com o sistema RIBRAS, inúmeros trabalhos em colaboração com vários grupos de pesquisa dentro e fora do país. Desse modo terei a oportunidade de participar desses trabalhos enriquecendo minha formação

científica. Além de realizar as medidas aqui propostas, poderei colaborar nos trabalhos de tese dos integrantes do grupo. Possuo bastante experiência com o sistema RIBRAS e com cálculos teóricos envolvidos neste projeto, em particular com os cálculos de CDCC, os quais poucas pessoas realizam no mundo, e diante disso, acredito que posso contribuir muito, nessa linha de pesquisa, com o presente projeto.

Referências

- [1] G.Rudstam; Nucl. Instr. and Methods. **38**(1965), 282.
- [2] I. Tanihata, H. Hamagati, O. Hashimoto and *et al.*, Phys. Rev. Lett. **55**, (1985), 2676.
- [3] I. Tanihata, H. Hamagati, O. Hashimoto and *et al.*, Phys. Lett. **B160**, (1985), 380.
- [4] R. Lichtenthäler, A. Lépine-Szily, V. Guimarães, M.S. Hussein
The Europ. Phys. Jou. **A25**, suppl. 1, (2005), 1773.
ver relatório FAPESP do processo no. 2001/06676-9.
- [5] P.N. Faria and *et al.*, Phys. Rev. **C81**, (2010), 044605.
- [6] P.N. Faria, Tese de Doutorado, IFUSP, 2008.
- [7] K.C.C. Pires. Tese de Doutorado a ser defendida, IFUSP, 2011.
- [8] D. Escrig, A.M. Sánchez-Benítez, c, A.M. Moro and *et al.*, Nuclear Physics **A792**, Issues 1-2, (2007), 2-17.
- [9] T. Aumann and *et al.*, Phys. Rev. **C59**, (1999), 1252.
- [10] M.S. Hussein, R. Lichtenthäler, F.M. Nunes, I.J. Thompson. Phys. Lett. **B640**, Issue 3, (2006), 91-95.
- [11] P.Mohr and *et al.*, Phys. Rev. **C82**, (2010), 044606.
- [12] K.C.C. Pires and *et al.*, CERN Proceedings no. 2010-001, 12th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna (Italy), Villa Monastero, vol.2 (2009), 337.
- [13] M. Majer and *et al.*, The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei. **43**(2), (2010), 153.

- [14] U. Atzrott, P. Mohr, H. Abele, C. Hillenmayer and G. Staudt. Phys. Rev. **C53**, (1996), 1336.
- [15] P. Mohr. Phys. Rev. **C62**, (2000), 061601(R).
- [16] M. Gaelens and *et al.*, Nuclear Instr. and Meth. **B204**, (2003).
- [17] F. D. Becchetti and *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. **A505**, (2003), 377.
- [18] T. Aumann, L. V. Chulkov, V. N. Pribora and M. H. Smedberg, Nucl. Phys. **A640**, (1998), 24.
- [19] D. Aleksandrov and *et al.*, Nucl. Phys. **A669**, (2000), 51.
- [20] R. Brun and F. Rademakers, <http://root.cern.ch/drupal/content/users-guide>, (1990).
- [21] W. T. Milner, Programas do VAXPAK, Oak Ridge National Laboratory, (1987).
- [22] I.J. Thompson. Comp. Phys. Rep. **7**, (1988), 167.



Kelly C. Cezaretto Pires
Pós-Doutoranda



Rubens Lichtenthäler Filho
Supervisor