

## Projeto de Acadêmico

**Autor: Prof. Dr. Rubens Lichtenthäler Filho**

**Instituto de Física da USP**

**Depto. de Física Nuclear**

**e-mail: [rubens@if.usp.br](mailto:rubens@if.usp.br)**

### 1. Ensino

Nos últimos 2 anos organizei o curso de Laboratório de Física para Farmácia onde fui coordenador. Foram programados 5 experimentos e elaboradas as apostilas guias para a realização destes experimentos. Além disso, organizei uma pagina dos curso no sistema e\_disciplinas. Tenho também ministrado cursos na Escola Politécnica. As aulas de laboratório são ministrados por mim e por um ou mais monitores que podem ser responsáveis por turmas, sob minha supervisão.

Além da carga didática normal a ser ministrada na graduação do IFUSP, tenho oferecido cursos na pós-graduação com certa periodicidade. Ministrei os cursos de 'Teoria de reações nucleares' e 'Tópicos em Reações Nucleares'. Neste último temos abordado temas atuais e de fronteira da física nuclear em baixas energias tais como, núcleos exóticos, astrofísica nuclear e outros.

Pretendo continuar ministrando os cursos na graduação e na pós-graduação.

Além disso, tenho orientado iniciações científicas no meu grupo de pesquisa. Considero a iniciação científica uma atividade muito importante na formação de estudantes de graduação. A distância entre um laboratório didático e um laboratório de pesquisa é muito grande atualmente, em parte, devido ao pouco investimento que tem sido feito nos laboratórios didáticos. Portanto, o contato com um grupo de pesquisa ativo em um laboratório profissional é fundamental e fornece ao aluno uma visão realista da atividade de pesquisa experimental (ou teórica) na área, possibilitando uma escolha mais embasada para o futuro de sua carreira profissional.

## **2. Atividades de extensão.**

As atividades de extensão envolvem principalmente a apresentação e organização de palestras, workshops e mini-cursos sobre a pesquisa desenvolvida. Trata-se de uma área de pesquisa de fronteira onde o RIBRAS é um equipamento único no Brasil e na América Latina. Tenho concedido entrevistas para jornais e revistas como a revista fapesp, e o Jornal da USP sobre a nossa linha de pesquisa.

Além disso, sou desde 2014 coordenador da ‘Comissão Assessora de Física Nuclear e Aplicações da SBF’, Sociedade Brasileira de Física. A atividade do CA de Física Nuclear e Aplicações tem sido bastante intensa nos últimos anos. O CA é responsável por várias ações envolvendo a área nuclear, desde a comunicação de todas as suas atividades como conferências, escolas e workshops em todo o mundo, até a organização e escolha das comissões organizadoras dos eventos nacionais como a *Reunião de Trabalhos em Física Nuclear no Brasil* e o *Encontro de Física* realizado a cada 5 anos. Além disso, o CA coordena as tomadas de decisão em assuntos que envolvem a comunidade tais como a sua possível união ao Encontro de Outono da SBF e outros.

Sou membro do grupo de trabalho da SBF sobre as Diretrizes da Política Nuclear Brasileira. Esta atividade está relacionada ao decreto 9600 de 2018 da Presidência da República onde são colocadas as diretrizes e os 9 grupos de trabalho (GT) que irão nortear toda a política nuclear brasileira nos próximos anos, envolvendo desde física básica e formação de recursos humanos, física aplicada, medicina nuclear e produção de radioisótopos, irradiação de alimentos, área de energia, produção e lavra de minério e outras. A coordenação destes 9 grupos de trabalho é do Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República e pela AMAZUL (Marinha do Brasil). A SBF participa como observadora e consultora em alguns destes grupos.

## **3. Pesquisa**

Sou o coordenador do sistema RIBRAS (*Radioactive Ion Beams in Brasil*) instalado na linha 45B do acelerador Pelletron do IFUSP. O sistema RIBRAS é uma facilidade utilizada por vários grupos de pesquisa de São Paulo, Rio de Janeiro e do exterior. O presente projeto inclui projetos de pesquisa de vários grupos de pesquisa de São Paulo e de outras universidades que propõe experimentos originais no RIBRAS. O RIBRAS é, no momento, a única facilidade na América Latina capaz de produzir feixes de núcleos fora da linha de estabilidade e permitir a realização de experimentos nesta área e é, atualmente, um equipamento multi-usuário utilizado em colaborações nacionais e internacionais envolvendo grupos de pesquisa de várias universidades como a Universidade Federal Fluminense, Universidade Federal de São Paulo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro,

Universidade de Sevilla (Espanha), Universidade de Notre Dame (EUA), Laboratório GANIL (França), Orsay (França), RIKEN (Japão) e Tandem (Argentina). Este projeto se insere no item 2.1 do Projeto Acadêmico do Departamento de Física Nuclear.

Abaixo o meu projeto de pesquisa, que envolve a utilização, manutenção e desenvolvimento desta facilidade.

**Projeto de pesquisa: A física de núcleos exóticos  
com o sistema RIBRAS (*Radioactive Ion Beams in Brasil*).**

**Resumo:** Estudos envolvendo núcleos leves fora da linha de estabilidade são atualmente um campo de pesquisa de grande interesse pois englobam desde novos fenômenos como o halo nuclear, estruturas de aglomerados (clusters), novos números mágicos, até implicações em problemas fundamentais da astrofísica nuclear como a síntese dos elementos pesados. No sistema RIBRAS produzimos feixes secundários de núcleos leves tais como  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^{10}\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{B}$  e outros. Desde 2004 temos realizado experiências com feixes secundários de vários destes núcleos em alvos, leves, médios e pesados. Neste período, foi desenvolvido um longo programa de medidas de espalhamento elástico, reações de dissociação (breakup) e transferência de neutrons no RIBRAS. Um passo além está sendo dado no sentido de se medir outros canais de reação como fusão nuclear e espalhamento inelástico, que são muito importantes para uma compreensão dos aspectos de estrutura e reações destes projéteis exóticos.

Atualmente o RIBRAS é um sistema multiusuário que conta com a participação de mais de 20 pesquisadores da USP-SP, UFF-RJ, UNIFESP além de colaboradores internacionais.

### **3.1. Introdução**

A física nuclear é atualmente uma das áreas mais extensas da física, envolvendo problemas fundamentais que vão desde da estrutura do núcleo, em energias baixas e intermediárias (MeV), até as altas energias (TeV) onde fenômenos ligados a novas formas da matéria são investigados, fazendo fronteira com a física de partículas. A instrumentação desenvolvida em laboratórios de física nuclear teve no passado, e continua tendo no presente, grande impacto na sociedade e em outras áreas da ciência, desde na medicina com as novas técnicas de imagens e terapias até na arqueologia e datação. Pesquisas atuais sobre matéria escura por exemplo, são feitas utilizando instrumentação desenvolvida originalmente para a física nuclear.

Na região de baixas energias, um extenso campo de pesquisa foi aberto com a produção, em laboratório, de feixes secundários de núcleos fora do vale de estabilidade. Existem na natureza aproximadamente 283 núcleos estáveis, que formam o vale de estabilidade, e mais de 3000 núcleos fora do vale de estabilidade. Alguns destes núcleos,

próximos das linhas de evaporação de nêutron e próton (*drip lines*), apresentam propriedades não usuais e são por isso denominados núcleos exóticos [1-7]. Na figura 1 está a carta de nuclídeos Z (no. de prótons) x N (no. de nêutrons) que mostra o vale de estabilidade em quadrados pretos. Em amarelo está representada a região de núcleos instáveis. A carta de nuclídeos é limitada à sua direita (região dos núcleos ricos em nêutrons) pela linha de evaporação de nêutrons e acima (ricos em prótons) pela linha de evaporação de prótons. Além destas linhas não existem núcleos ligados com os quais se possa produzir feixes secundários. As meias-vidas dos núcleos ligados variam enormemente, de alguns microsegundos até dias enquanto que os núcleos não ligados (além das linhas de evaporação) têm meias-vidas muito menores, da ordem de  $10^{-16}$  a  $10^{-21}$  segundos.

A quantidade de temas em aberto envolvendo a física dos núcleos fora do vale de estabilidade é muito grande e algumas destas questões estão referidas na figura 1.

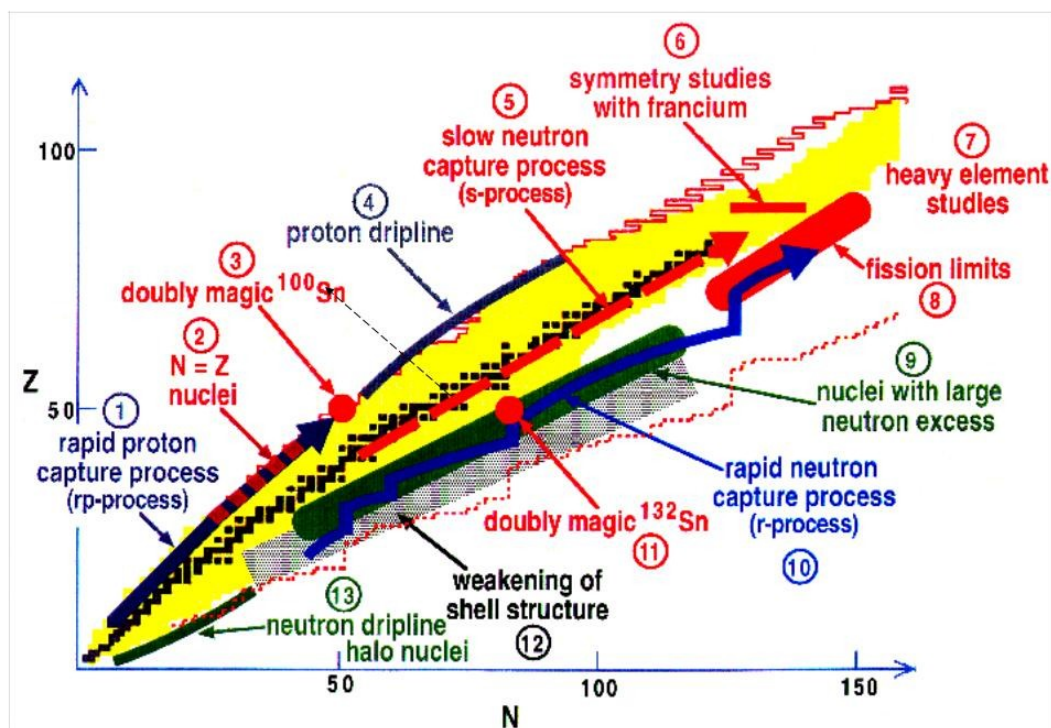


Fig. 1 Carta de nuclídeos.

O estudo de núcleos instáveis engloba aspectos novos da matéria nuclear em situações extremas de isospin (excesso de prótons ou de nêutrons), baixas energias de ligação e baixas densidades de matéria nuclear, onde o núcleo atômico pode apresentar novas geometrias como “enormes” halos formados de nêutrons. Sabe-se que a densidade da matéria nuclear em núcleos estáveis apresenta o fenômeno de saturação, ou seja, é praticamente constante, o que leva a conhecida relação entre o raio dos núcleos (R) e o número de nucleons (A);  $R=r_0 \cdot A^{1/3}$ . O halo de nêutrons entretanto, apresenta densidade de matéria nuclear muito menor do que a densidade observada em núcleos estáveis, o que representa uma violação da relação citada acima [8].

Até o momento, mesmo a posição das linhas de evaporação (*drip-lines*) é indeterminada em algumas regiões da carta de núclídeos. Por outro lado, situações extremas de isospin como em núcleos extremamente ricos em nêutrons são um teste para os modelos nucleares e podem apresentar novas estruturas de camadas, com diferentes números mágicos, além de novos modos coletivos de excitação como as ressonâncias *pygmy* [9], que são oscilações da 'pele' de neutrons em relação ao caroço, em núcleos ricos em nêutrons.

Há ainda situações de simetria que podem ser obtidas com núcleos fora da linha de estabilidade, e que não são encontradas nos estáveis, como exemplo, núcleos pesados ricos em prótons com  $N=Z$  (isospin=0), ou a utilização de isótopos de núcleos pesados como o Fr, Pa e outros, que apresentam deformações particulares, com interesse no estudo de simetrias fundamentais como a violação CP e medidas do momento de dipolo elétrico do nêutron.

As implicações da física nuclear em áreas como a cosmologia é reconhecida, como por exemplo, nos processos de nucleosíntese dos elementos no BigBang e nas estrelas. Um dos campos mais importantes que se abrem com o advento de feixes de núcleos instáveis é o da possibilidade de se medir secções de choque de reações de interesse astrofísico [10]. O "Big Bang" formou basicamente Hidrogênio e Hélio. Todos os elementos encontrados no universo foram formados em reações nucleares nas estrelas, a partir deste Hidrogênio e Hélio primordiais e estas reações são a fonte básica de energia no universo. Muitas das reações nucleares em estrelas massivas envolvem reações de fusão de próton e neutron com núcleos instáveis (exóticos) que não tiveram tempo de decair e o conhecimento destas secções de choque é fundamental para a compreensão do que ocorre, por exemplo, em explosões de supernovas. O processo de captura rápida de nêutrons (processo-r) representado na figura 1, é o responsável pela formação dos elementos mais pesados do que o Ferro, e ocorre próximo à linha de evaporação de nêutrons. Medidas de massas de núcleos instáveis nesta região são de fundamental importância para compreender a formação dos elementos pesados.

Ainda na astrofísica, na região de núcleos leves há problemas em aberto como o estudo da influência de estados ressonantes em reações de captura, em que os núcleos exóticos podem dar uma contribuição significativa. Este é o caso por exemplo da captura  ${}^3\text{He}+{}^3\text{He}$ , importante no modelo solar, e que pode ser estudada indiretamente por meio de reações de transferência envolvendo projéteis instáveis como a reação  ${}^3\text{He}({}^7\text{Be},\alpha){}^6\text{Be}$ . Neste caso, o feixe de  ${}^7\text{Be}$  é utilizado como 'ferramenta' para se obter informações sobre um outro núcleo altamente exótico, o  ${}^6\text{Be}$ , que é o sistema composto da reação de captura  ${}^3\text{He}+{}^3\text{He}$ . O  ${}^7\text{Be}$  é um dos feixes que produzimos no RIBRAS.

Na região de núcleos leves, a inexistência de núcleos estáveis de massas  $A=5$  e  $A=8$  representa uma barreira para a nucleosíntese dos elementos mais pesados do que o Hélio. É sabido que a nucleosíntese do Carbono ocorre através de um processo de tripla captura de partículas alfa através de um estado ressonante do Carbono (ressonância Hoyle). Núcleos exóticos leves como o  ${}^8\text{Li}$  e o  ${}^6\text{He}$  certamente têm um papel relevante na nucleosíntese pois podem atuar como "ponte" na superação dos gaps de massas  $A=5$  e  $A=8$  e na formação dos

elementos mais pesados [13].

A secções de choque de reações de captura de 2 neutrons como a  ${}^4\text{He}+n+n\rightarrow{}^6\text{He}$  são importantes ingredientes nos modelos de nucleossíntese dos elementos pesados e podem ser obtidas estudando-se o processo inverso, que consiste na dissociação ou *breakup* do  ${}^6\text{He}\rightarrow{}^4\text{He}+n+n$ , processo este que tem sido estudado no Pelletron-RIBRAS [12-14] em São Paulo através da colisão de  ${}^6\text{He}$  em alvos pesados e leves.

Além do interesse da pesquisa básica em física nuclear, a tecnologia envolvida na produção e no estudo de núcleos exóticos gerou inúmeras aplicações. Dentre elas podemos citar a recente produção de fontes de íons e aceleradores de alta intensidade que permitem a terapia de tumores utilizando feixes de prótons de altas energias. Este tipo de terapia permite que a energia do acelerador seja ajustada de modo a maximizar os efeitos da radiação no tumor e minimizar na superfície do corpo humano e nas áreas sãs, o que é desejável.

Além disso, núcleos exóticos como o  ${}^{18}\text{F}$ ,  ${}^{99}\text{Tc}$  são largamente utilizados em medicina em diagnósticos utilizando a técnica PET (Positron Emission Tomography), cintilografia e outras. O estudo de núcleos fora da linha de estabilidade também tem importância em áreas como a geração de energia e na possibilidade da transmutação de lixo radioativo utilizando-se aceleradores de prótons de altas intensidades. A utilização de aceleradores de prótons de alta intensidade acoplados a reatores nucleares (*ADS Accelerator Driven System*) tem sido objeto de estudos e, eventualmente, permitirão no futuro o desenvolvimentos de reatores nucleares que trabalhariam num regime subcrítico, com o acelerador de prótons gerando os nêutrons necessários para atingir a criticalidade por meio de reações de espalação, aumentando assim sua segurança, além da possibilidade de se reutilizar o combustível nuclear.

O presente projeto tem como objetivo continuar e estender a linha de pesquisa que tem sido desenvolvida no RIBRAS nos últimos 15 anos como será descrito em detalhes nas seções a seguir.

### ***3.2 A produção de feixes exóticos em baixas energias***

Atualmente no mundo, estão sendo feitos grandes investimentos em vários laboratórios dos continentes americano (FRIB, Triumf), europeu (GSI) e asiático (RIKEN-Japão, Coreia e China) entre outros, para a construção de facilidades para o estudo de núcleos exóticos. Algumas destas facilidades estão no momento entrando em operação e permitirão a produção de núcleos em várias regiões de massa, desde núcleos leves até núcleos superpesados.

No Brasil, está em operação o equipamento RIBRAS (*Radioactive Ion Beams in Brasil*) [2,3] que permite a realização de experiências com feixes de núcleos exóticos leves em baixas energias. Este equipamento consiste de 2 solenóides supercondutores em

operação em uma das linhas de feixe do Laboratório Aberto de Física Nuclear (LAFN) do IFUSP.

A produção de núcleos fora da linha de estabilidade pode ser feita pelos seguintes mecanismos de reação:

- *reações de transferência de poucos nucleons*
- *fusão- evaporação*
- *espalação do alvo*
- *fissão*
- *fragmentação do projétil*

A escolha do mecanismo mais adequado para a produção do feixe secundário depende de diversos fatores, tais como o tipo de núcleos que se deseja produzir (ricos em prótons ou ricos em nêutrons), a energia do feixe primário disponível e o tipo de processo de separação do feixe secundário que será utilizado. A filtragem e separação do feixe secundário pode ser feita diretamente em vóo por meio de dipolos magnéticos e filtros de velocidade, ou pelo processo denominado ISOL (*Isotopic on Line Separator*).

O projeto RIBRAS leva em conta o fato de que o feixe primário do Pelletron não tem energia suficiente para sofrer a fragmentação do projétil. As secções de choque de fragmentação em energias intermediárias (30-100 MeV/A) são da ordem de 100 mb. Nas baixas energias do Pelletron de São Paulo, é necessária a utilização de um separador com grande ângulo sólido de aceitação para compensar as secções de choque de produção que são bem menores, da ordem de dezenas de mb, para as reações de produção, tais como transferências e fusão. Neste caso, solenóides são os separadores ideais pois possuem ângulos sólidos tipicamente seis vezes maiores do que os dipolos.

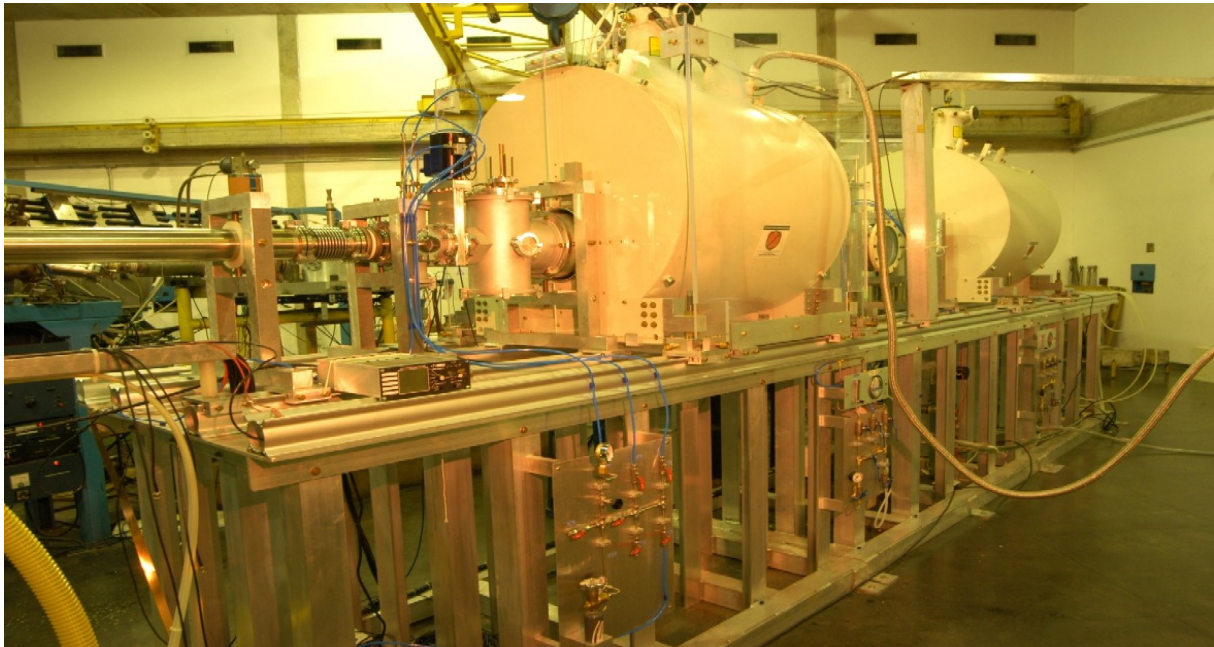
O sistema RIBRAS consiste em 2 solenóides supercondutores mostrados na figura 2. Com este sistema produzimos feixes de núcleos leves, a partir de reações de transferência de poucos nucleons, como os exemplos mostrados na tabela 1.

*Tabela 1: Reações de produção utilizadas no sistema RIBRAS*

Feixe secundario	Reação de produção	Qgs (MeV)	Intensidade (pps)	Resolução em energia (keV)/ energia	Pureza (%) 1 solenoide (2 solenoides)
${}^6\text{He}$	${}^9\text{Be}({}^7\text{Li}, {}^6\text{He})$	-3.39	$10^5$	1000/22 MeV	16 (92)



${}^7\text{Be}$	${}^3\text{He}({}^6\text{Li}, {}^7\text{Be})$	0.11	$10^4\text{-}10^5$	800/19 MeV	2
${}^7\text{Be}$	${}^7\text{Li}({}^6\text{Li}, {}^7\text{Be})$	-4.37	$10^4\text{-}10^5$	1000/22 MeV	2
${}^8\text{Li}$	${}^9\text{Be}({}^7\text{Li}, {}^8\text{Li})$	0.37	$10^5\text{-}10^6$	500/26 MeV	44 (98)
${}^8\text{B}$	${}^3\text{He}({}^6\text{Li}, {}^8\text{B})$	-1.98	$10^4$	1000/16 MeV	4.4
${}^{10}\text{Be}$	${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, {}^{10}\text{Be})$	4.64	$10^5$	800/23 MeV	3
${}^{12}\text{B}$	${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, {}^{12}\text{B})$	1.70	$10^5$	800/25 MeV	



*Fig. 2 - Sistema RIBRAS de duplo solenoide.*

### **3.3. A Pesquisa realizada no RIBRAS**

Este equipamento está em operação desde 2004 e temos realizado estudos sistemáticos de medidas de espalhamento elástico e reações entre núcleos exóticos e alvos de várias massas [14-25]. A seguir discutiremos alguns aspectos desta pesquisa com base em dados experimentais obtidos no RIBRAS.

O espalhamento elástico é o processo mais simples que pode ocorrer na colisão de dois núcleos, pois a energia cinética e o momento angular são conservados, bem como a identidade dos núcleos colidentes. Em baixas energias é o processo mais importante em termos de secção de choque e fornece informação sobre o potencial nuclear e a secção de choque total de reação.

Além disso, as medidas de distribuições angulares de espalhamento elástico contém efeitos que podem vir do acoplamento com outros canais de reação, fornecendo assim



informação indireta sobre estes canais. No caso do espalhamento entre núcleos estáveis, e mesmo alguns exóticos, em energias próximas à barreira Coulombiana, as distribuições angulares de espalhamento elástico apresentam um padrão mais ou menos típico de todos os sistemas leves-pesados. Em ângulos dianteiros, o espalhamento é Coulombiano puro e a secção de choque é igual a secção de Rutherford. Na medida em que aumentamos o ângulo de espalhamento, a força nuclear de curto alcance começa a atuar e desvios da secção de choque de Rutherford são observados. Em ângulos relativamente dianteiros, estes desvios basicamente se resumem a um padrão oscilatório que denominamos difração de Fresnel, devida a interferência entre ondas parciais refletidas e refratadas respectivamente nos potenciais Coulombiano e nuclear e que emergem no mesmo ângulo de espalhamento (Fig.3).

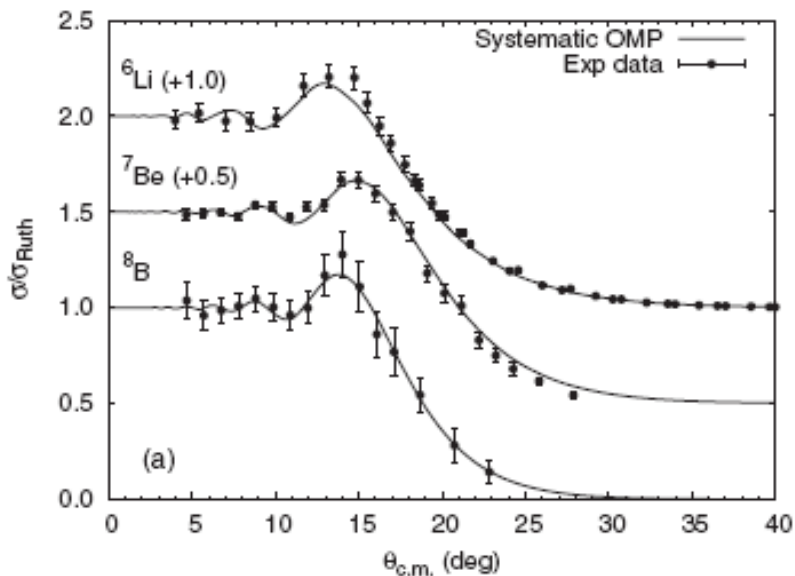


Fig.3 - Espalhamento  ${}^6\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$  em 99 MeV,  ${}^7\text{Be} + \text{Pb}$  em 125 MeV e  ${}^8\text{B} + {}^{\text{nat}}\text{Pb}$  em 170 MeV [26].

Para ângulos mais traseiros, os efeitos refrativos (V) e absorptivos (W) do potencial óptico começam a atuar provocando uma diminuição do fluxo espalhado no canal elástico. Para projéteis exóticos, tipo halo de nêutrons, um padrão bastante diferente tem sido observado.

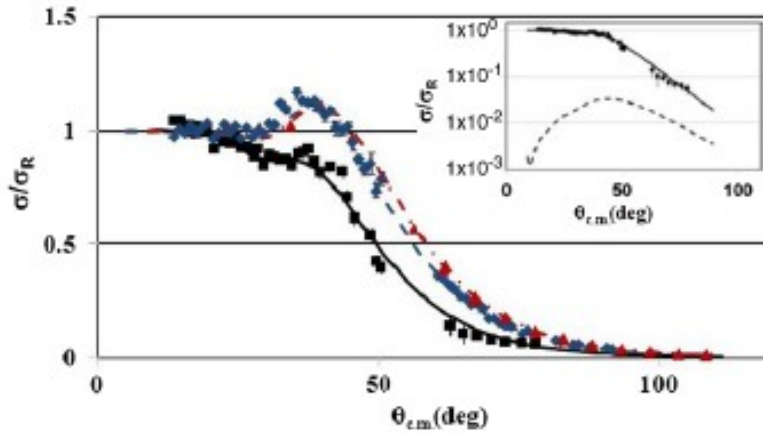


Fig.4 -  $^{9,10,11}\text{Be} + ^{64}\text{Zn}$  em energias em torno da barreira coulombiana [27].

Na figura 4 mostramos distribuições angulares de  $^{9,10,11}\text{Be} + ^{64}\text{Zn}$  [27] onde podemos observar a diferença entre o espalhamento com um projétil halo, o  $^{11}\text{Be}$  e outros isótopos 'normais' do mesmo elemento. No caso do  $^{11}\text{Be}$  o pico de Fresnel praticamente desapareceu e as oscilações são atenuadas.

A razão para isto está no forte acoplamento com o canal de *breakup* do projétil que, sendo um núcleo halo e fracamente ligado, se quebra facilmente mesmo no campo Coulombiano do alvo.

O mesmo comportamento pode ser visto na figura 5 onde apresentamos dados de  $^6\text{He} + ^{120}\text{Sn}$  obtidos no RIBRAS e cálculos de CDCC de 4 corpos com e sem o efeito do *breakup* do projétil.

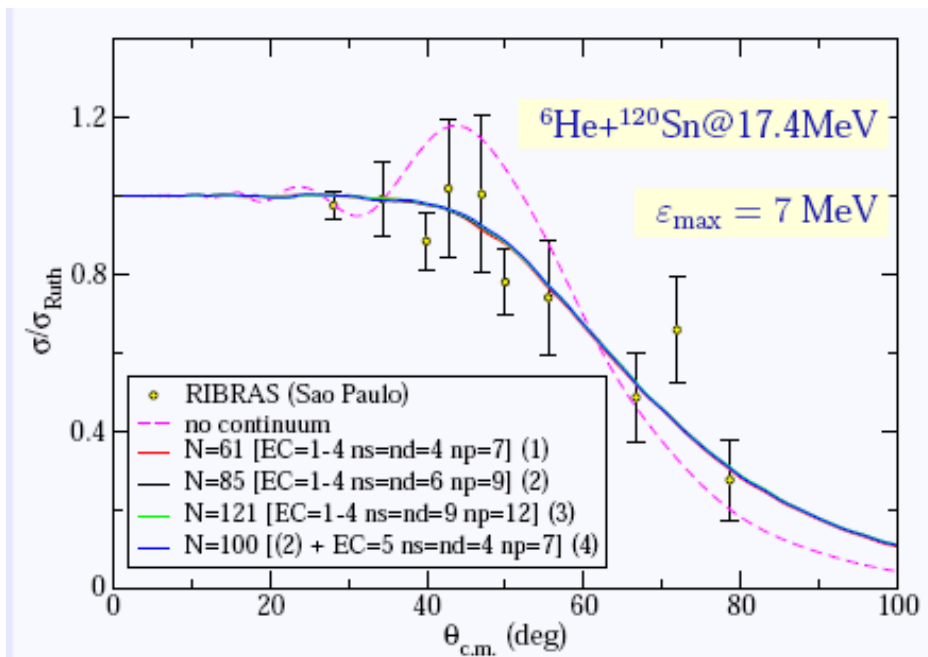


Fig. 5 – Espalhamento  $^6\text{He} + ^{120}\text{Sn}$  em 17,4 MeV medido no RIBRAS [12].

Este fenômeno tem sido bastante estudado, tanto do ponto de vista experimental como teórico e tem grande interesse por alguns motivos. Primeiramente, serve como base para a determinação do potencial de interação projétil (exótico-halo) com o alvo. Neste potencial, efeitos de 3 corpos podem estar presentes através do acoplamento com o canal de *breakup* do projétil, como no caso do  ${}^6\text{He}$  que é um núcleo Borromeano formado por uma partícula alfa e 2 nêutrons. Desta forma, medidas do espalhamento de  ${}^6\text{He}$  podem servir como 'laboratório' para estudos de forças de 3 corpos, que são fundamentais em física.

Além disso, o forte acoplamento com o canal de *breakup* permite em princípio uma determinação indireta de parâmetros como as probabilidades de transição  $B(E1)$  e  $B(E2)$  que estão relacionados com as deformações Coulombiana e nuclear e que podem ser úteis na astrofísica e em modelos de estrutura nuclear.

Em sistemas mais leves como o  ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$  o padrão das distribuições angulares muda, pois as energias estão agora bem acima da barreira Coulombiana, e o pico de Fresnel se desloca para ângulos muito dianteiros e não é mais visível. Neste caso, a interação nuclear de curto alcance se torna dominante e observamos um padrão oscilatório típico de uma figura de difração tipo Fraunhofer, como vemos na figura 6.

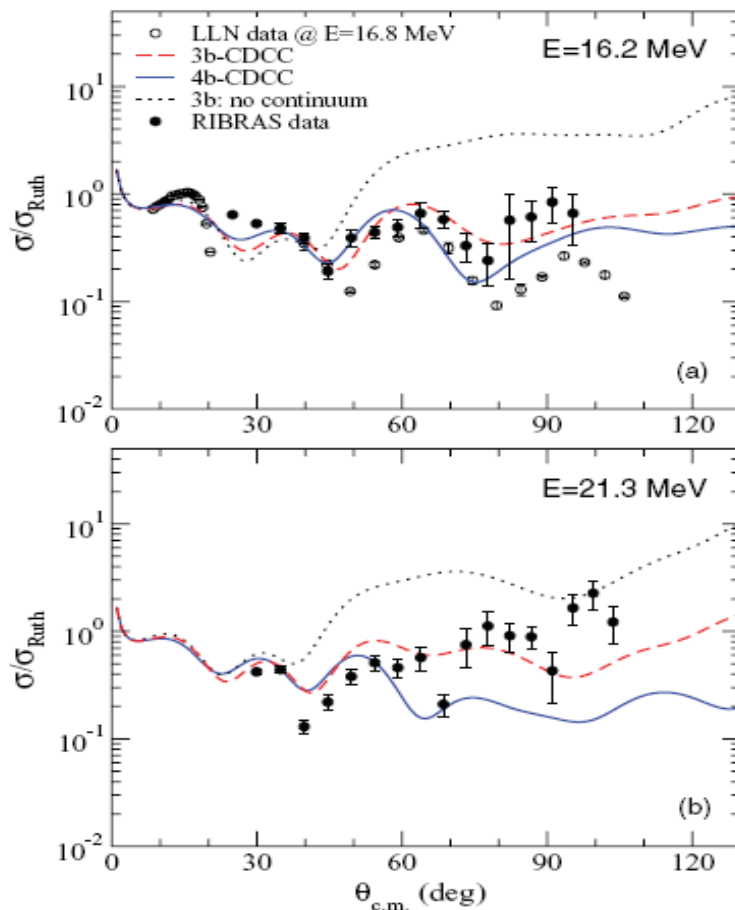


Fig. 6 – Espalhamento  ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$  medidos no RIBRAS [18] e cálculos de CDCC de 3 e 4 corpos.

Entretanto, o efeito do *breakup* nuclear é muito importante como vemos na comparação entre os cálculos sem acoplamento (*no continuum*) e os cálculos de CDCC de 3

e 4 corpos.

Além de informações sobre o potencial de interação entre o projétil e alvo, o espalhamento elástico fornece a secção de choque total de reação. Para se poder comparar secções de reação totais para diferentes sistemas deve-se levar em conta que há uma dependência com o raio do sistema, que é puramente geométrica, além de uma dependência com a energia. Por isso deve-se comparar na verdade secções de reação 'reduzidas', ou seja, que levem em conta os efeitos geométricos e de energia. O método mais simples para se obter a secção reduzida foi proposto originalmente por P. Gomes e consiste em se obter  $\sigma_{red} = \sigma_{exp} / (A_p^{1/3} + A_t^{1/3})^2$  e  $E_{red} = E_{cm} / Z_p Z_t / (A_p^{1/3} + A_t^{1/3})$  onde  $\sigma_{exp}$  é na verdade a secção total de reação obtida de um cálculo de modelo óptico ou CDCC que reproduz a distribuição angular. Este tipo de análise comparativa foi feita com dados de espalhamento de  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^{6,7}\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{16}\text{O}$  em alvos pesados, medios e leves. Na figura 7 (abaixo) mostramos alguns resultados desta análise para um alvo pesado [12]

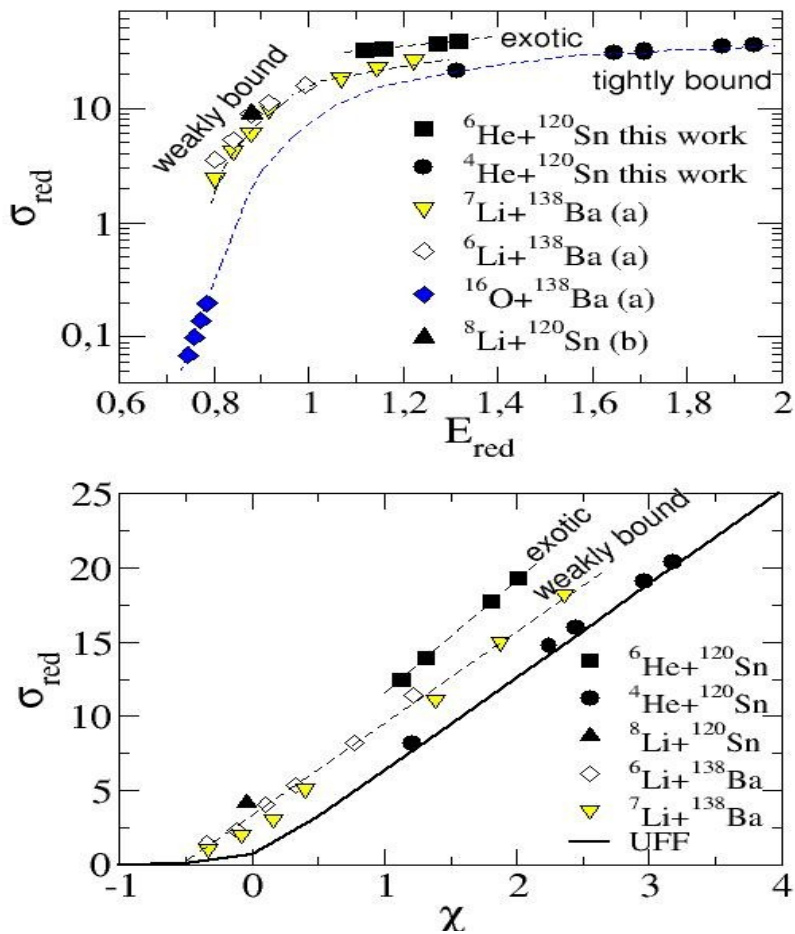


Fig. 7 – Secção de choque total de reação reduzida para sistemas em torno de  $A=120$  com projéteis estáveis, fracamente ligados e exóticos [12]. Acima a redução usual proposta por P. Gomes (ver texto), abaixo a redução pela fórmula de Wong [12].

Observamos que há 3 classes de secção de choque total: a menor para projéteis fortemente ligados ou duplamente mágicos como o  ${}^4\text{He}$  e  ${}^{16}\text{O}$ , a intermediária para projéteis fracamente ligados como o  ${}^{6,7}\text{Li}$  e  ${}^9\text{Be}$  e a secção de choque mais alta para o  ${}^6\text{He}$ .

Este padrão tem sido observado em várias outras análises de outros sistemas e por outros autores [P.Mohr (Physical Review C 82, 047601 (2010)), E.Aguilera (Phys. Rev. C 83, 021601(R) (2011))]. Foi observado também em alvos de massa intermediária, como o  $^{51}\text{V}$  [V. Morcelle (mestrado, IFUSP)] e mesmo em leves como o  $^9\text{Be}$  [K.C.C. Pires et al. Physical Review C 90, 027605 (2014)] entretanto com menor intensidade. Recentemente observamos o mesmo comportamento no espalhamento do projétil halo de protons  $^8\text{B}$  em  $^{27}\text{Al}$  [24].

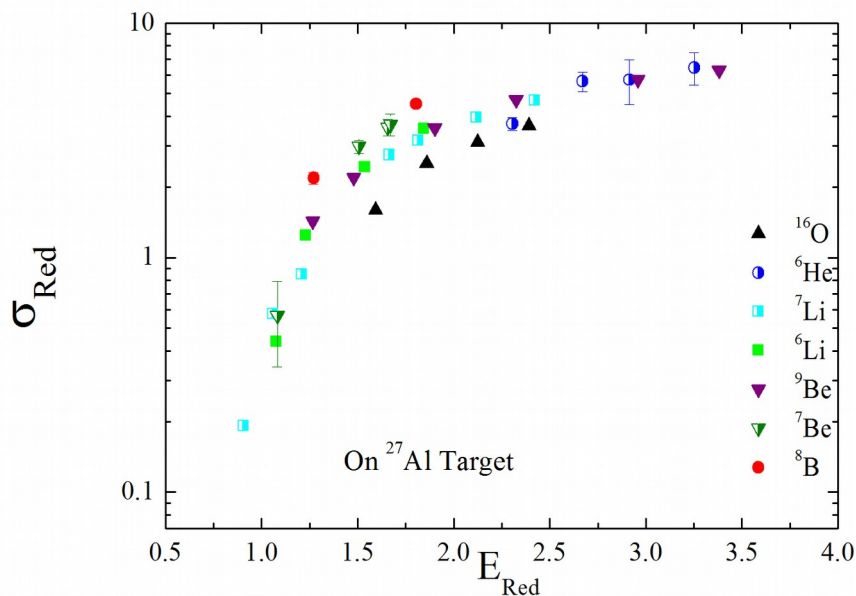


Fig. 8 – Secção de choque de reação reduzida para diferentes projéteis, incluindo o halo de protons  $^8\text{B}$ , em alvo de  $^{27}\text{Al}$  [24].

Em 2018 publicamos um artigo [25] onde apresentamos um novo método para obter a secção de choque de reação e fusão a partir de um modelo geométrico simples [28] que pode ser utilizado para reduzir os dados de secção de choque de reação e os resultados são comparáveis aos obtidos usando-se modelos de potencial mais sofisticados como o double-folding.

O aumento na secção de reação total para sistemas com menor energia de ligação está relacionado com o fato de que mais canais de reação são abertos, e o efeito é ainda mais intenso, no caso de projéteis que além de serem fracamente ligados são núcleos halo como o  $^6\text{He}$ . No caso de alvos pesados, a interação Coulombiana é importante e conseqüentemente, reações podem ocorrer no campo Coulombiano o que amplifica este efeito. No caso de alvos leves, a interação nuclear de curto alcance é dominante e o efeito é menor.

A questão que se coloca agora é a identificação dos canais de reação que estão causando este aumento na secção total de reação.

Reações de fusão-evaporação onde um sistema composto é formado ou canais de reação diretos como o *breakup* do projétil, ou ainda uma situação intermediária onde apenas uma parte do projétil se funde com o alvo formando um sistema composto, fusão incompleta ou transferência.

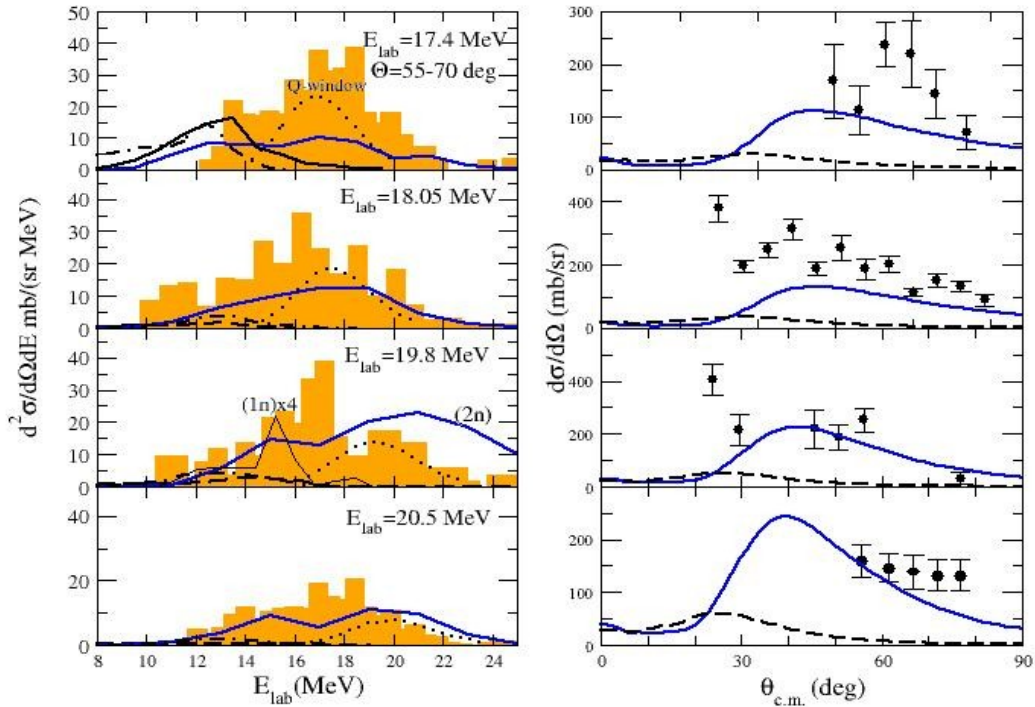


Fig. 9 – Distribuição de energias das partículas alfa emitidas da reação  $^{120}\text{Sn}(^6\text{He}, \alpha)$  (esquerda), e as correspondentes distribuições angulares (direita).

Na figura 9 mostramos dados do RIBRAS [16] da distribuição de partículas alfas produzidas na colisão  $^6\text{He} + ^{120}\text{Sn}$ . À esquerda vemos a distribuição de energias das alfas e a direita a distribuição angular correspondente para 4 energias de feixe. Vemos que os dados indicam uma distribuição de energias mais próxima do previsto por cálculos de transferência de 2 neutrons do  $^6\text{He}$  para o  $^{120}\text{Sn}$  (linha azul), do que o previsto pela fusão-evaporação (sólida) ou *breakup* do projétil (traço-ponto) que fornecem uma distribuição centrada em energias menores do que o observado. O mesmo ocorre para as distribuições angulares (direita) indicando que a transferência (azul) é o processo dominante e o *breakup* (dashed) tem secção de choque bem abaixo dos dados. Em 2019 publicamos um artigo no Physical Review C [14] com dados recentes desta reação em outras energias obtidos no RIBRAS, mostrando que a distribuição de energia da partículas alfas emitidas da reação  $^{120}\text{Sn}(^6\text{He}, \alpha)$  se desloca para valores negativos de Q-reação na medida em que a energia de bombardeamento aumenta com um comportamento esperado para um sistema rotor quântico.

### 3.4 A câmara secundária do RIBRAS.

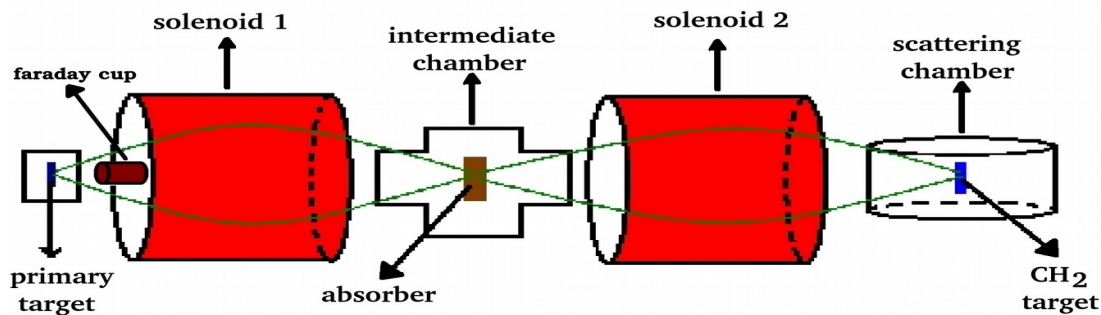
Algumas das experiências citadas acima foram realizadas utilizando-se apenas o primeiro solenoide e uma câmara de espalhamento localizada entre os 2 solenoides que foi adaptada para medidas de distribuições angulares.

A partir de 2011, terminamos a montagem da câmara de espalhamento secundária do RIBRAS após o segundo solenoide. Desde então realizamos várias experiências utilizando a camara secundária [2]. Isto representou um avanço nas condições experimentais, pois permitiu medidas com feixes secundários mais puros em comparação com as realizadas até

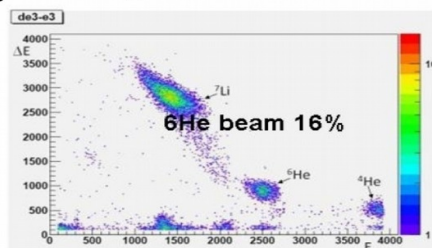


então com apenas 1 solenoide. Além disso, medidas de tempo de vôo serão possíveis graças ao aumento da distância de vôo.

Na figura 10 mostramos uma foto, um esquema do novo *setup* e um espectro de  ${}^6\text{He}$  antes e depois do segundo solenoide. A utilização de uma folha degradadora (*mylar*) no ponto de cruzamento na câmara do meio, permite uma seleção adicional em  $B\rho$  do feixe pelo segundo solenoide, o que aumenta sua pureza de 16% para 92%. No caso do feixe de  ${}^8\text{Li}$  a purificação é ainda maior.



(a) using only one solenoid



(b) using a double solenoid

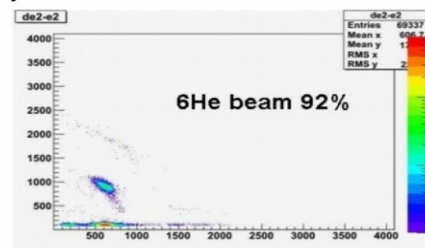


Fig. 10 - Sistema de duplo solenoide RIBRAS e um espectro mostrando a purificação dos feixe de  ${}^6\text{He}$  pelo segundo solenoide.

Medidas da reação  $p({}^8\text{Li},p){}^8\text{Li}$  foram feitas por Erich Leistenschneider (mestrado) e foram publicadas no Physical Review C [29]. Este tipo de medida fornece informações sobre estados do núcleo composto em altas energias de excitação, devido ao fato de estarmos utilizando núcleos fracamente ligados no canal de entrada.

Além do que foi citado acima, há vários experimentos em andamento, como medidas de espalhamento elástico, distribuições angulares e funções de excitação em



ângulos traseiros, que estão programados para a nova câmara de espalhamento. Além disso, há um projeto de medida de espalhamento inelástico do  $^8\text{Li}$  em alvos pesados para se obter as probabilidades de excitação reduzida do primeiro estado excitado do  $^8\text{Li}$  utilizando coincidência partícula-gama. A detecção dos gamas será feita utilizando cristais LYSO que permitem utilização em campos magnéticos.

Outras propostas como medida de reações de fusão por medidas *off-line* e *on-line* do decaimento de resíduos de evaporação estão sendo cogitados.

### **3.5 Aspectos inovativos do presente projeto.**

A Física com núcleos fora da linha de estabilidade consiste na fronteira da física nuclear de baixas energias. Apesar de ser uma área que surgiu na década de 1980, há ainda um grande número de problemas em aberto, especialmente na região de baixas energias onde o presente projeto se enquadra. Relativamente pouca pesquisa experimental com feixes exóticos foi feita nesta região de energia, já que a maioria das facilidades no mundo produzem feixes secundários em energias mais altas.

Com a entrada em operação dos 2 solenoides em 2011 e uma maior pureza do feixe secundário estamos entrando em uma nova fase no RIBRAS, em que pretendemos medir canais de reação, além do espalhamento elástico, como a fusão. Muita informação pode ser obtida a partir do espalhamento elástico, entretanto é necessário dar um passo além e desenvolver técnicas experimentais para identificar outros canais de reação, especialmente o canal de fusão, que é o canal mais importante em termos de secção de choque, depois do espalhamento elástico. A fusão com projéteis tipo halo tem interesse em vários aspectos fundamentais da física nuclear e em áreas correlatas como a astrofísica nuclear e aplicadas como na produção de energia. Além disso, a fusão envolvendo projéteis ricos em nêutrons é um processo ainda não totalmente compreendido e que pode ter consequências em questões de extrema importância como na síntese de elementos super-pesados. O processo de tunelamento da barreira Coulombiana que ocorre na fusão abaixo da barreira envolve questões fundamentais da mecânica quântica. No caso de reações envolvendo núcleos estáveis é mais ou menos bem estabelecido que há o fechamento de canais de reação na medida em que a energia se aproxima da barreira Coulombiana. Já com projéteis exóticos verificou-se que canais de reação diretos ainda são importantes, mesmo em energias abaixo da barreira. A identificação de canais de reação diretos, e sua separação de processos via núcleo composto, entretanto, é difícil pois alguns produtos de reação são os mesmos em muitos casos. Por isso são necessárias medidas em coincidência de partículas carregadas, gamas e neutrons produzidos na reações.

Do ponto de vista experimental e de instrumentação várias inovações estão previstas no presente projeto no sentido de permitir a seleção e identificação de canais de reação. Como

exemplo, citamos a montagem de detectores gama utilizando cristais cintiladores LYSO que foram adquiridos pelo projeto FAPESP 2013/22100-7 e estão sendo montados pelo grupo do Prof. Dr. José Roberto Brandão de Oliveira, com quem estamos trabalhando em colaboração.

Em maio de 2018 realizamos uma primeira experiência utilizando detectores LYSO quando medimos gamas da reação  $^8\text{Li}+^{120}\text{Sn}$ , fusão e inelástico. Os dados são muito promissores e estão sendo analisados por Appannababu Selaboina.

Além disso, prevemos a instalação do pré-buncher no acelerador Pelletron, com a produção de feixe pulsado. O sistema já foi testado e possui resolução em tempo da ordem de 1 ns, suficiente para medidas de velocidade do feixe entre o alvo primário e o alvo secundário, onde o tempo de voo é da ordem de 100ns. Medidas de velocidade associadas a medida de energia da partícula no detector E fornecerão uma seleção em massa da partícula incidente no alvo, permitindo sua identificação e a posterior seleção dos eventos de interesse, eliminando-se eventos provenientes de feixes contaminantes.

### **3.6 Produção do RIBRAS nos últimos 5 anos:**

- 22 trabalhos publicados em revistas especializadas.

- 1 capítulo de livro: **Frontiers in Nuclear and Particle Physics vol.1**

*Multi-electronic Processes in Collisions Involving Charged Particles*

**DOI:** 10.2174/97816810861321180101 ; EISBN: 9781681086132

<http://ebooks.benthamscience.com/book/9781681086132>

autores: V. Morcelle, M. Rodríguez-Gallardo, R. Lichtenthäler

- 5 dissertações de mestrado e 1 doutorado finalizados e 4 doutorados em andamento.

-6 pós-doutorados finalizados e 3 em andamento

### **3.7 Referências**

[1] N. Keeley, N. Alamanos, K. W. Kemper, and K. Rusek, Prog. Part. Nucl. Phys. 63, 396 (2009).

[2] R. Lichtenthäler, M. A. G. Alvarez, A. Lépine-Szily, S. Appannababu, K. C. C. Pires, U. U. da Silva, V. Scarduelli, R. P. Condori, N. Deshmukh. Few-Body Syst. 57, 157 (2016).

[3] A. Lépine-Szily, R. Lichtenthäler, V. Guimarães, Eur. Phys. J. A50, 128 (2014).

[4] B. B. Back, H. Esbensen, C. L. Jiang, and K. E. Rehm, Rev. Mod. Phys. 86, 317 (2014).

[5] L. F. Canto, P. R. S. Gomes, R. Donangelo, J. Lubian, and M. S. Hussein, Phys. Rep. 596, 1 (2015).

[6] P. R. S. Gomes, J. Lubian, L. F. Canto, D. R. Otomar, D. R. Mendes Junior, P. N. de Faria, R. Linares, L. Sigaud, J. Rangel, J. L. Ferreira, E. Ferioli, B. Paes, E. N. Cardozo, M.

- R. Cortes, M. Ermamatov, P. Lotti, and M. S. Hussein, *Few-Body Syst.* 57, 165 (2016).
- [7] J. J. Kolata, V. Guimarães, and E. F. Aguilera, *Eur. Phys. J. A* 52, 1 (2016).
- [8] I. Tanihata, H. Hamagaki, O. Hashimoto, Y. Shida, and N. Yoshikawa Tanashi, K. Sugimoto, O. Yamakawa, and T. Kobayashi N. Takahashi *Phys. Rev. Lett.* 55 no.24, 2676 (1985).
- [9] J. Piekarewicz *Phys. Rev. C* 83, 034319 (2011).
- [10] J. José and C. Iliadis, *Rep. Progr. Phys.* 74, 096901 (2011).
- [11] V. Guimarães, R. Lichtenthäler et al. *Phys. Rev. C* 75, 054602 (2007).
- [12] P.N. de Faria et al. *Phys. Rev. C* 81, 044605 (2010).
- [13] O. Camargo, V. Guimarães, R. Lichtenthäler et al. *Phys. Rev. C* 78, 034605 (2008).
- [14] S. Appannababu et al, *Phys. Rev C* 99, 014601 (2019).
- [15] E. A. Benjamim, et al. *Physics Letters. B*, 647:(30–35), 2007.
- [16] P.N. de Faria et al. *Phys. Rev. C* 82, 034602 (2010).
- [17] P. Mohr et al. *Phys. Rev. C* 82, 044606 (2010).
- [18] K.C.C. Pires et al., *Phys. Rev. C* 83, 064603 (2011).
- [19] J. C. Zamora et al. *Phys. Rev. C* 84, 034611 (2011).
- [20] A. Barioni et al., *Phys. Rev. C* 80, 034617 (2009).
- [21] D.R. Mendes et al., *Phys. Rev. C* 86, 064321 (2012).
- [22] V. Morcelle et al., *Phys. Rev. C* 89, 044611 (2014).
- [23] V. Morcelle et al., *Phys. Lett. B* 732, 228 (2014).
- [24] V. Morcelle et al., *Phys. Rev. C* 95, 014615 (2017).
- [25] K.C.C. Pires, S Appannababu, O. C. B. Santos, R. Lichtenthäler, *Phys. Rev. C* 98 014614 (2018).
- [26] Y. Y. Yang et al, *Phys. Rev. C* 87, 044613(2013).
- [27] A. Di Pietro et al *Phys. Rev. Lett.* 105, 022701 (2010).
- [28] A. S. Freitas et al. *Braz J Phys* 46:120–128 (2016).
- [29] E. Leistenschneider et al., *Phys. Rev. C* 98, 064601 (2018).