

RELATÓRIO DAS ATIVIDADES DE PESQUISA
PÓS-DOCTORAMENTO

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

Kelly Cristina Cezaretto Pires

Supervisor: Prof. Dr. Rubens Lichtenthäler Filho

Instituição: Universidade de São Paulo - Instituto de Física

Processo FAPESP: 2010/18687-4

Período: 05/2012 a 11/2012



Kelly C. Cezaretto Pires
Pós-Doutoranda



Rubens Lichtenthäler Filho
Supervisor

ÍNDICE

1	Resumo do Plano Inicial	1
2	Resumo das Atividades Realizadas	2
3	Detalhamento das Atividades Realizadas	4
3.1	O Espalhamento ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ em $E_{\text{lab}}=11,8$ MeV	4
3.1.1	Distribuição Angular Elástica	5
3.1.2	Cálculo de Modelo Óptico	6
3.2	O Espalhamento ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ em $E_{\text{lab}}=16,2$ e $21,3$ MeV	8
3.2.1	Cálculo de Modelo Óptico	8
3.2.2	Produção de Partículas- α e Eventos Inelásticos	10
3.2.3	Análise da Distribuição de Partículas- α	10
3.2.4	Análise dos Eventos Inelásticos	17
3.2.5	Secção de Choque de Reação	19
3.3	Detector de Nêutrons	22
4	Resposta ao Questionamento do Acessor	26
5	Plano de Trabalho	28
6	Atividades Acadêmicas	29
6.1	Artigos Publicados	29
6.2	Trabalhos Completos Publicados	30
6.3	Apresentação de Trabalhos e Participação em Eventos	31
6.4	Resumos de Trabalhos Publicados em Anais de Eventos	31

6.5 Participação em Projetos de Pesquisa - Experimentos	35
---	----

Bibliografia	36
---------------------	-----------

Resumo do Plano Inicial

O estudo de núcleos fora da linha de estabilidade é um dos campos mais ativos na física nuclear nos últimos anos. A possibilidade de produção de feixes secundários de núcleos distantes da linha de estabilidade permite a investigação de núcleos com estruturas distintas quando comparados aos núcleos estáveis conhecidos na natureza. Os núcleos mais distantes da linha de estabilidade são caracterizados por possuírem valores baixos de energias de ligação, e em alguns casos, valores altos de isospin. Esses núcleos constituem uma ferramenta importante para testar os modelos nucleares existentes, além de serem fundamentais na nucleossíntese e em processos estelares.

Este projeto de pesquisa consiste em investigar a colisão entre o núcleo exótico ${}^6\text{He}$ e o alvo leve ${}^9\text{Be}$. O feixe exótico foi produzido através da colisão entre o feixe primário de ${}^7\text{Li}$ (elemento estável) e o alvo sólido de ${}^9\text{Be}$. O experimento foi realizado no Laboratório Aberto de Física Nuclear (LAFN) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo utilizando o acelerador Pelletron em conjunto com o sistema RIBRAS (*Radioactive Ion Beams in Brasil*). Foi medida uma distribuição angular do espalhamento elástico ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ à energia de $E_{\text{lab}}=11,8$ MeV e o resultado obtido está apresentado neste relatório.

Resumo das Atividades Realizadas

Durante o período que compreende o relatório (mai-nov/2012) trabalhei nos dados experimentais obtidos na colisão ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ à $E_{\text{lab}}=11,8$ MeV. Também dediquei grande parte do tempo na elaboração de um artigo referente a produção de partículas- α e a secção de choque total de reação, obtidas na colisão ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ à $E_{\text{lab}}=16,2$ MeV e $E_{\text{lab}}=21,3$ MeV (ver *Anexo 1*).

Em jul/2012 participei da *13th Conference on Nuclear Reaction Mechanisms* que ocorreu na cidade de Varenna, na Itália, onde tive a oportunidade de apresentar oralmente o trabalho desenvolvido neste projeto. Em set/2012, participei da *XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil* que ocorreu na cidade de Maresias, litoral de São Paulo, onde apresentei meu trabalho na forma de poster.

Além disso, participei da montagem experimental, testes e tomada de dados, envolvendo o sistema RIBRAS, realizada pelo *Grupo de Reações Diretas e Núcleos Exóticos*:

1. Agosto/2012: Montagem experimental e testes com o sistema RIBRAS.
2. Setembro/2012: Experimento referente ao projeto de doutorado do aluno Rubén Pampa-Condori (orientando do Prof. Dr. Rubens Lichtenthäler Filho).

Também fui responsável pelo abastecimento, com nitrogênio líquido, dos solenóides que compõe o sistema RIBRAS e pelo sistema de recuperação de

gás hélio existente no LAFN, acompanhando a retirada e recebimento dos cilindros de gás. Além disso, auxiliei o abastecimento dos solenóides com hélio líquido.

Detalhamento das Atividades Realizadas

3.1 O Espalhamento ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ em $E_{\text{lab}}=11,8\text{ MeV}$

No início de 2012, como mencionado no relatório anterior, foram realizadas medidas de espalhamento elástico para o sistema ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ na energia de $E_{\text{lab}}=11,80\text{ MeV}$ ($E_{\text{cm}}=7,08\text{ MeV}$, $E_B^{\text{cm}}=2,22\text{ MeV}$) utilizando o sistema RIBRAS em conjunto com o acelerador Pelletron do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.

Para a realização do experimento, utilizou-se a tensão de $V_{\text{TERM}}=5,5\text{ MV}$ no terminal do acelerador e a corrente de $I_{\text{sol}}=35\text{ A}$ no primeiro solenóide. Um exemplo dos espectros biparamétricos obtidos pode ser visto na Figura 3.1.

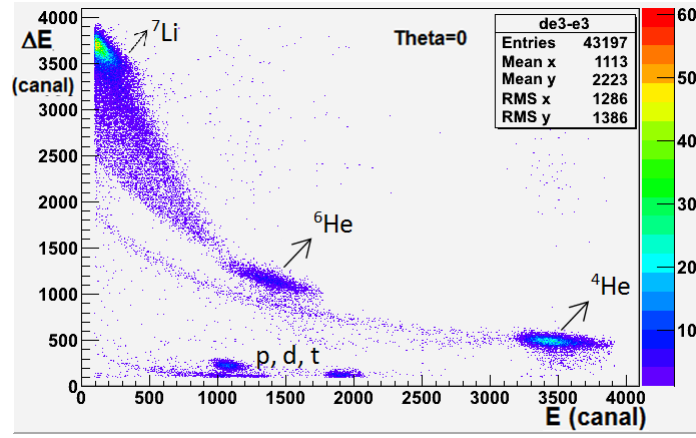


Figura 3.1: Espectro biparamétrico ΔE - E obtido com feixe de ${}^6\text{He}$ e alvo de ${}^{197}\text{Au}$ em $\theta_{\text{lab}}=0^\circ$ utilizando um absorvedor de CH_2 de 6 mg/cm^2 de espessura.

3.1.1 Distribuição Angular Elástica

Distribuições angulares medidas com feixes radioativos são geralmente normalizadas com o auxílio de medidas efetuadas com alvo de ${}^{197}\text{Au}$, uma vez que estas possuem o comportamento do espalhamento descrito por Rutherford nas energias e ângulos medidos. Este procedimento é realizado pois não tem-se uma medida direta da intensidade do feixe secundário durante o *run*. Assim, a secção de choque experimental foi obtida a partir da seguinte normalização:

$$\frac{d\sigma^{6\text{He}+9\text{Be}}/d\Omega}{d\sigma_R^{6\text{He}+9\text{Be}}/d\Omega} = \frac{d\sigma^{6\text{He}+197\text{Au}}/d\Omega}{d\sigma_R^{6\text{He}+9\text{Be}}/d\Omega} \cdot \frac{N_c^{\text{Be}}}{N_c^{\text{Au}}} \cdot \frac{J^{\text{Be}}}{J^{\text{Au}}} \cdot \left(\frac{I^{\text{Au}}}{I^{\text{Be}}} \right) \cdot \frac{N_a^{\text{Au}}}{N_a^{\text{Be}}} \quad (3.1)$$

Os feixes secundários radioativos possuem baixa intensidade o que torna necessária a utilização de detectores com ângulos sólidos grandes e consequentemente uma correção no ângulo médio das partículas detectadas. Utilizando um código computacional corrigimos a distribuição angular experimental ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ e a apresentamos na Figura 3.2.

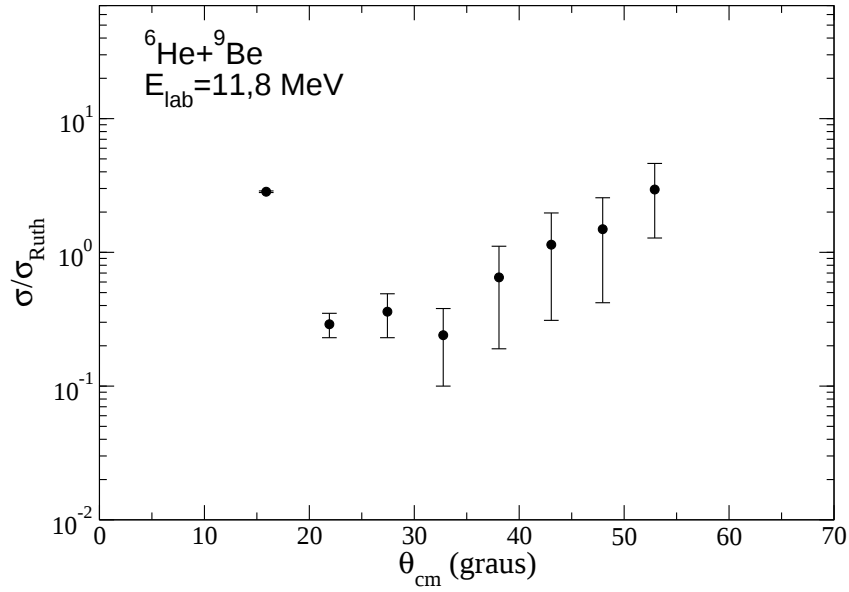


Figura 3.2: Distribuição angular para o espalhamento elástico ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ em $E_{\text{lab}}=11,8$ MeV.

3.1.2 Cálculo de Modelo Óptico

Foram realizados cálculos de Modelo Óptico (MO) para o espalhamento elástico ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ em $E_{\text{lab}}=11,8$ MeV utilizando o código computacional FRESKO [1]. O Modelo Óptico permite a obtenção do potencial nuclear de interação e da seção de choque total de reação.

Para a realização destes cálculos foi utilizado um potencial da literatura, obtido para o sistema ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ em $E_{\text{lab}}=16,2$ MeV [2]. Além disso, utilizamos o potencial de São Paulo para comparação.

Tabela 3.1: Conjunto de parâmetros utilizados no cálculo de Modelo Óptico para o espalhamento elástico ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ em $E_{\text{lab}}=11,8$ MeV.

<i>Conj</i>	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	a_0 (fm)	W_0 (MeV)	r_{id} (fm)	a_{id} (fm)	σ_{reac} (mb)	χ^2	Ref.
c_1	46,97	1,20	0,80	3,32	2,41	0,86	1588	-	[2]
c_{1a}	140,25	1,36	1,00	2,00	1,90	0,62	1044	1,85	-

Afim de otimizar o cálculo, utilizou-se o código computacional SFRESCO e variou-se os parâmetros impondo uma restrição na geometria. O resultado obtido pode ser visto na Figura 3.3. Os parâmetros do potencial antes (conjunto c_1) e após o ajuste (conjunto c_{1a}) estão apresentados na Tabela 3.2.

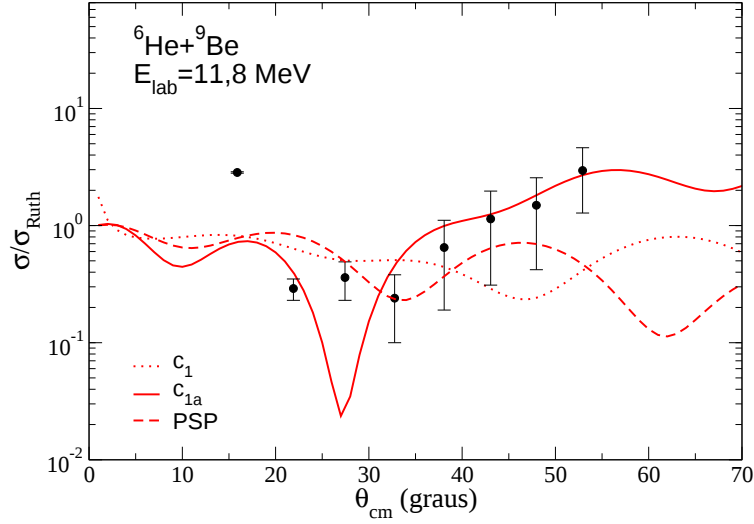


Figura 3.3: Distribuição angular do espalhamento elástico ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ para $E_{\text{lab}}=11,8$ MeV. A linha pontilhada corresponde ao cálculo de MO utilizando o conjunto c_1 e a linha contínua corresponde ao cálculo com ajuste nos parâmetros (conjunto c_{1a}). A linha tracejada corresponde ao cálculo utilizando o Potencial de São Paulo.

A distribuição angular experimental apresentada na Figura 3.3 possui poucos pontos experimentais e grandes barras de erro. Estes dados deverão ser verificados afim de confirmarmos o aumento de $\sigma/\sigma_{\text{Ruth}}$ em ângulos maiores. Um efeito semelhante é visto no espalhamento ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ à energia de $E_{\text{lab}}=21,3$ MeV [2].

3.2 O Espalhamento ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ em $E_{\text{lab}}=16,2$ e $21,3$ MeV

3.2.1 Cálculo de Modelo Óptico

Foram realizados cálculos de Modelo Óptico (MO) para as distribuições angulares do espalhamento elástico ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ obtidas em $E_{\text{lab}}=16,2$ MeV e $E_{\text{lab}}=21,3$ MeV. Neste cálculo, o núcleo ${}^6\text{He}$ foi considerado como um sistema de dois corpos ($\alpha+2n$) e a interação efetiva projétil-alvo foi calculada usando o potencial apresentado na Equação 3.2:

$$V_{\text{opt}} = \langle \phi_{6He} | V_{[2n+{}^9\text{Be}]} + V_{[\alpha+{}^9\text{Be}]} | \phi_{6He} \rangle \quad (3.2)$$

onde ϕ_{6He} é a função de onda do estado fundamental do ${}^6\text{He}$ e foi calculada utilizando o modelo de partícula única considerando os dois nêutrons como uma única partícula [3]. Para as interações (α - ${}^9\text{Be}$) e ($2n$ - ${}^9\text{Be}$) utilizamos potenciais de Wood-Saxon mostrados na Tabela 3.2. Em particular, os parâmetros para a interação ($2n$ - ${}^9\text{Be}$) foram ajustados para reproduzir os dados experimentais. Os cálculos foram realizados utilizando o código computacional SFRESCO, que faz parte do código FRESKO [1].

Tabela 3.2: Parâmetros utilizados e obtidos no cálculo de Modelo Óptico.

E_{lab}	Potencial	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	a_0 (fm)	W_0 (MeV)	r_i (fm)	a_i (fm)	σ_{reac} (mb)	Ref.
	$\alpha+{}^9\text{Be}$	50,00	1,85	0,55	2,50	1,85	0,55	-	[4]
	$2n+\alpha$	96,06	1,90	0,25	-	-	-	-	[3]
16.2	$2n+{}^9\text{Be}$	61,01	1,51	0,55	20,00	1,20	1,01	1513	-
21.3	$2n+{}^9\text{Be}$	21,41	1,51	0,54	10,02	1,35	1,56	1944	-

Os resultados obtidos são mostrados na Figura 3.4. A linha contínua representa o cálculo de Modelo Óptico com uma correção que leva em conta a resolução angular experimental [2]. Para efeito de comparação a linha pontilhada representa o cálculo de Modelo Óptico sem a correção. Observando a Figura 3.4 pode-se dizer que tais cálculos reproduzem bem o comportamento

dos dados experimentais.

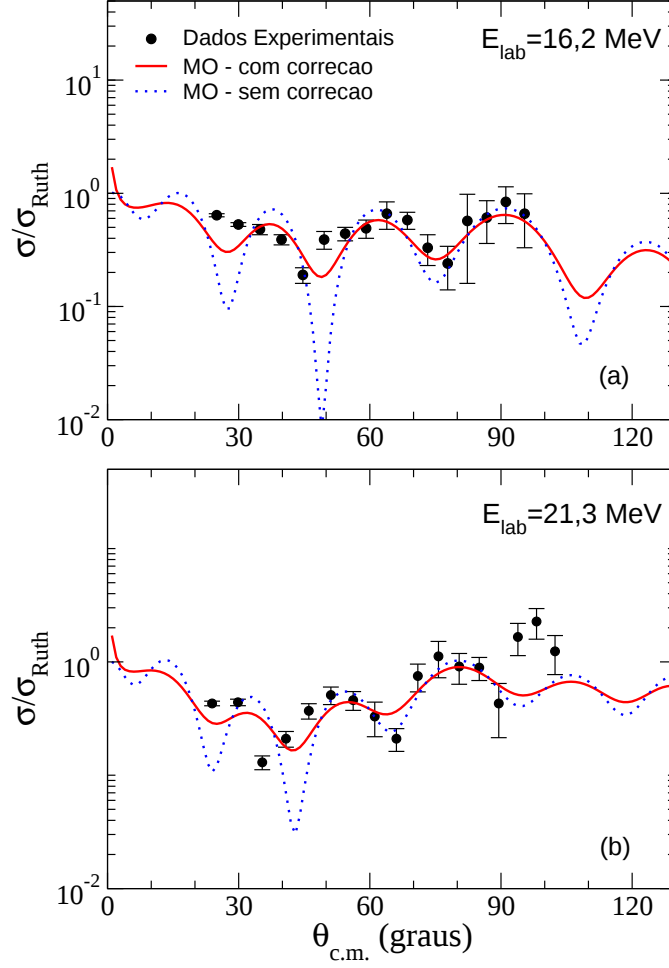


Figura 3.4: Distribuição angular do espalhamento elástico ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ em (a) $E_{\text{lab}}=16,2$ MeV e (b) $E_{\text{lab}}=21,3$ MeV. Os círculos sólidos são os dados experimentais e as linhas contínuas são resultados dos cálculos de Modelo Óptico. Estes cálculos foram convolucionados com a resolução angular experimental [2] e, para comparação, o cálculo sem correção também é apresentado (linha pontilhada).

3.2.2 Produção de Partículas- α e Eventos Inelásticos

Uma ampla distribuição de partículas- α pode ser vista nos espectros biparamétricos obtidos na colisão do feixe exótico ${}^6\text{He}$ com alvo de ${}^9\text{Be}$, porém não é vista nos espectros obtidos com alvo de ${}^{197}\text{Au}$ (ver Figura 3.5) [2]. A barreira coulombiana para o sistema ${}^6\text{He}+{}^{197}\text{Au}$ é muito grande ($E_B=22,40$ MeV) quando comparada com a barreira para o sistema envolvendo o alvo de ${}^9\text{Be}$ ($E_B=2,27$ MeV). Diante deste fato, o núcleo ${}^6\text{He}$ (feixe) não tem energia suficiente para romper a barreira e se quebrar no campo nuclear do alvo, que é de curto alcance. Assim, a presença da faixa das partículas- α é observada somente no espectro biparamétrico obtido com alvo de ${}^9\text{Be}$ e indica que o *breakup* nuclear do projétil e do alvo são importantes canais de reação.

Além disso, observando os espectros biparamétricos obtidos com alvo de ${}^9\text{Be}$, podemos notar que existem eventos relacionados ao núcleo ${}^6\text{He}$ com energia inferior a do pico do espalhamento elástico. Como o projétil ${}^6\text{He}$ não possui estados excitados ligados, nossa hipótese é de que estes eventos correspondam a colisão ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ em que houve a excitação de estados do alvo ${}^9\text{Be}$. Porém, como os estados excitados do núcleo ${}^9\text{Be}$ também não são ligados, interpretamos estes estados como devidos a quebra do alvo (*breakup* do ${}^9\text{Be}$).

3.2.3 Análise da Distribuição de Partículas- α

Um estudo envolvendo a distribuição das partículas- α foi realizado com o objetivo de obter informações a respeito da quebra do projétil ${}^6\text{He}$ e do alvo ${}^9\text{Be}$ já que ambos levam a produção dessa partícula. Nesta análise foi considerada toda a distribuição em energia das partículas- α desconsiderando os espalhamentos elásticos ${}^4\text{He}^{2+}+{}^9\text{Be}$ e ${}^4\text{He}^{1+}+{}^9\text{Be}$ que vem do feixe contaminante de ${}^4\text{He}$. Além disso, desconsideramos eventos com energia superior ao

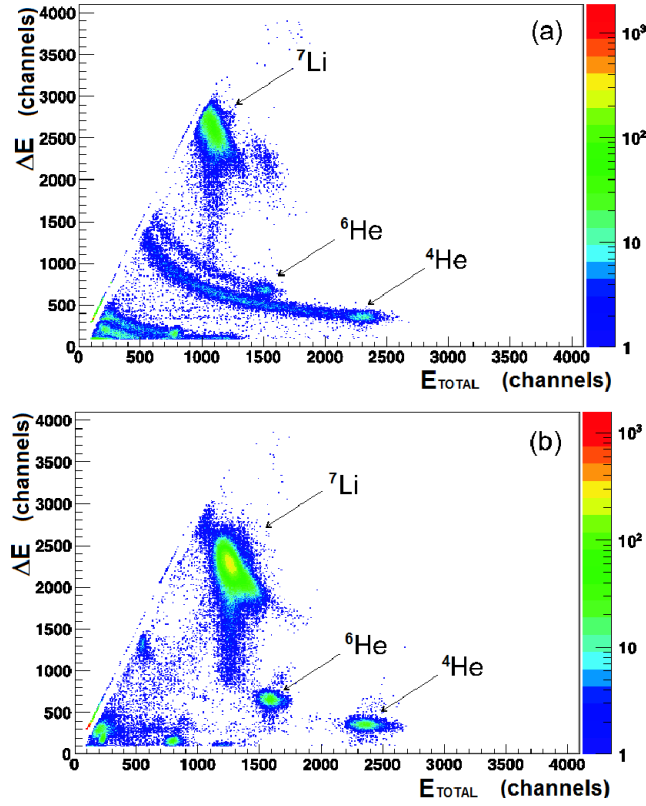


Figura 3.5: Espectros biparamétricos $\Delta E \times E_T$ obtidos com feixe de ${}^6\text{He}$ para $\theta_{\text{lab}}=15^\circ$ utilizando alvos de (a) ${}^9\text{Be}$ e (b) ${}^{197}\text{Au}$.

espalhamento elástico ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$, pois espera-se que o *breakup* produza eventos com energia, em média, menor do que a do ${}^6\text{He}$ elástico. Os eventos com energia superior estão, provavelmente, relacionados a outras reações.

Analizamos estes dados integrados em ângulo, com objetivo de aumentar a estatística. Para isso, construímos espectros de contagens *versus* energia de excitação do núcleo ${}^{11}\text{Be}$. Isso foi feito transformando-se o eixo de energia total do ${}^6\text{He}$ dos espectros biparamétricos para energia de excitação do núcleo ${}^{11}\text{Be}$ através de relações cinemáticas. Considerando o espalhamento ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ como representado na Figura 3.6, podemos escrever:

$$\begin{aligned}
E_0 &= E_1 + E_2 + E_x \\
p_0 &= p_1 \cos\theta + p_2 \cos\varphi \\
p_1 \sin\theta &= p_2 \sin\varphi
\end{aligned} \tag{3.3}$$

onde E_0 é a energia inicial do ${}^6\text{He}$, E_1 e E_2 são as energias dos núcleos ${}^6\text{He}$ e ${}^{11}\text{Be}$ após o espalhamento, respectivamente, p_0 é o momento linear inicial do ${}^6\text{He}$, p_1 e p_2 representam o momento linear dos núcleos ${}^6\text{He}$ e ${}^{11}\text{Be}$ após o espalhamento, respectivamente.

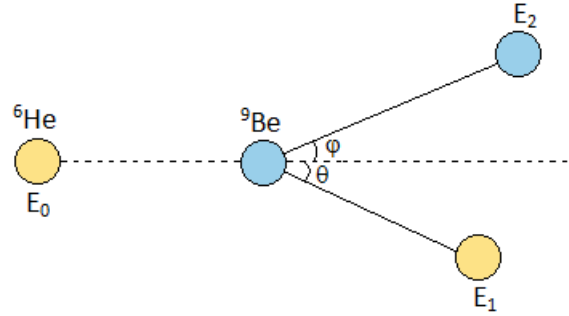


Figura 3.6: Esquema da cinemática do espalhamento ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$.

Resolvendo as equações, temos:

$$E_x = E_0 \left(1 - \frac{m_0}{m_2}\right) - E_1 \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) + \frac{2}{m_2} \sqrt{m_0 m_1 E_0 E_1} \cos\theta \tag{3.4}$$

onde m_0 é a massa do núcleo ${}^6\text{He}$, m_1 é a massa do núcleo ${}^4\text{He}$ e m_2 é a massa do núcleo ${}^{11}\text{Be}$.

Assim, obtivemos o espectro biparamétrico, como mostrado na Figura 3.7.

Como a energia de excitação não depende do ângulo, é possível somar os espectros de todos os ângulos medidos, aumentando assim a estatística. A projeção da faixa das partículas- α obtida pode ser vista na Figura 3.8.

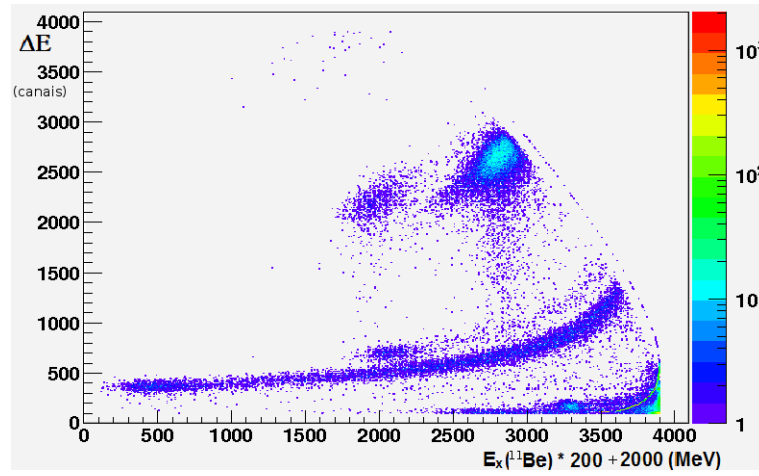


Figura 3.7: Espectro biparamétrico $\Delta E \times E_x({}^{11}\text{Be})$ obtido após cálculos de cinemática.

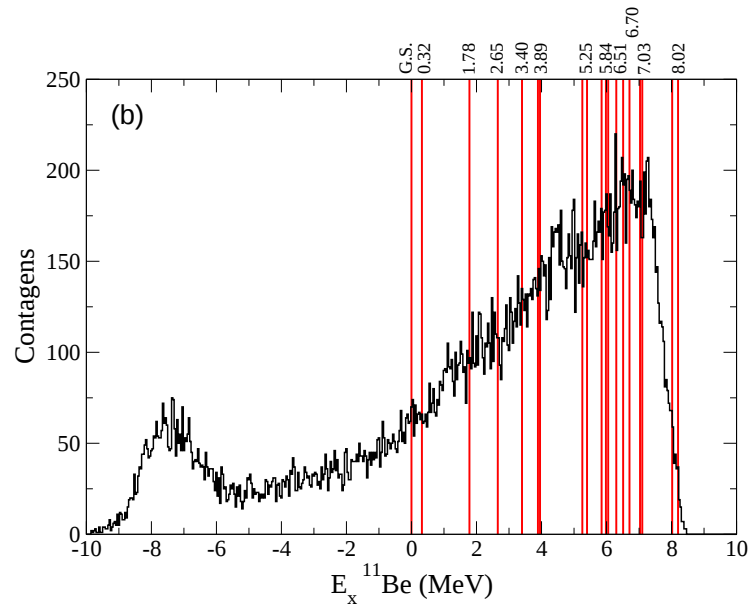


Figura 3.8: Espectro apresentando o Número de Contagens $\times$ Energia de Excitação (E_x) do núcleo ${}^{11}\text{Be}$. As linhas verticais indicam estados deste núcleo.

As linhas verticais indicam as posições de alguns estados presentes no espectro de níveis do núcleo ${}^{11}\text{Be}$, que pode ser visto na Figura 3.9. O pico

posicionado na região de energia negativa corresponde ao feixe contaminante de partículas- α . Nenhum pico é claramente visto na região do estado fundamental ($E_x=0$ MeV) e grande parte dos eventos está concentrada na região de energia de excitação alta ($E_x \approx 4-6$ MeV) indicando que o processo de *breakup* do projétil ou transferência de nêutrons para estados do alvo com energias de excitação altas podem ser importantes.

A secção de choque foi obtida utilizando uma normalização com medidas envolvendo alvo de ${}^{197}\text{Au}$ conforme a Equação 3.5.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_\alpha} = \frac{N_c^\alpha}{N_c^{Au}} \frac{I^{Au}}{I^{Be}} \frac{N_a^{Au}}{N_a^{Be}} \frac{d\sigma^{6\text{He}+{}^{197}\text{Au}}}{d\Omega_R} \quad (3.5)$$

Na Figura 3.10 a distribuição de partículas- α experimental, que foi re-analisada no período que compreende o relatório, é comparada com os resultados de cálculos de *Canais Acoplados com Discretização do Contínuo* de 3 corpos (3b-CDCC) para o *breakup* do projétil [2].

As secções de choque de *breakup* para todos os *bins* foram integradas e transformadas para o sistema de laboratório antes de comparar com os dados experimentais. Vemos que o acordo com relação a forma da distribuição angular é razoável, porém fatores de normalização de $N = 1, 3$ para a energia menor e $N = 2, 5$ para a energia maior são necessários para reproduzir os dados. Este resultado é razoável, uma vez que os dados experimentais devem envolver vários processos, podendo existir a contribuição de outras reações que envolvam feixes contaminantes.



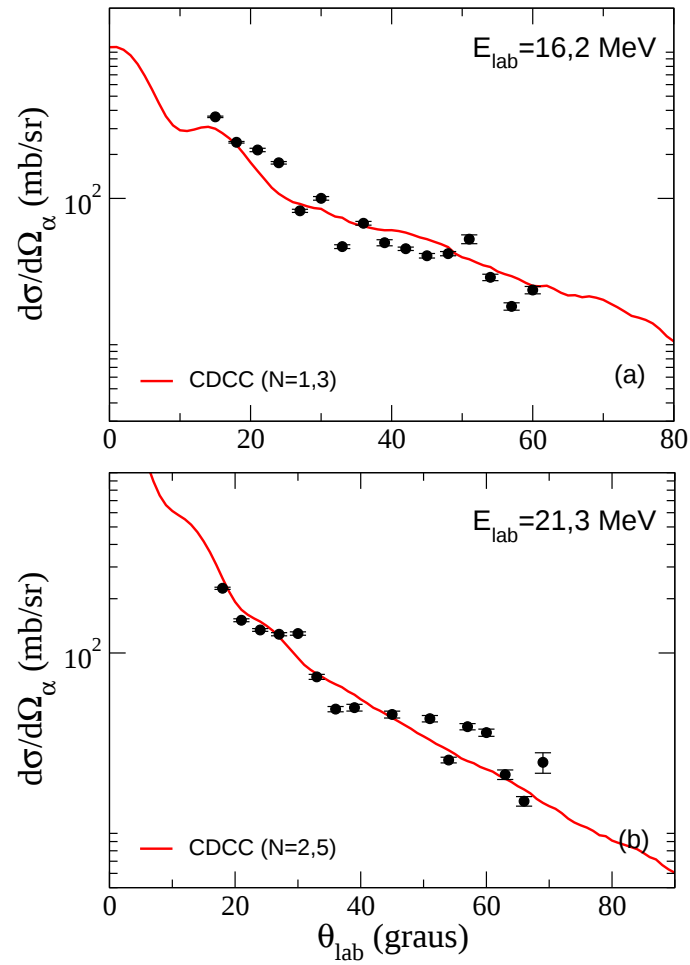


Figura 3.10: Distribuição angular da faixa das partículas- α em $E_{\text{lab}}=16,2$ MeV e (b) $E_{\text{lab}}=21,3$ MeV.

3.2.4 Análise dos Eventos Inelásticos

A distribuição angular dos eventos de ${}^6\text{He}$ com energia inferior à do pico do espalhamento elástico ($E < E_{\text{elástico}}$) foi obtida considerando N_c^α como sendo N_c^{6He} na Equação 3.5.

Estes dados foram analisados integrados em ângulo, com objetivo de aumentar a estatística. Foi construído um espectro de contagem *versus* energia de excitação do núcleo ${}^9\text{Be}$, transformando-se o eixo de energia total do ${}^6\text{He}$ dos espectros biparamétricos para energia de excitação do ${}^9\text{Be}$ através de relações cinemáticas. O processo utilizado foi analogo ao descrito na Seção 3.2.3 para a faixa das partículas- α . A partir disso, as distribuições angulares experimentais foram calculadas. Este procedimento foi realizado há algum tempo e pode ser visto na Ref. [6].

No período que compreende o relatório, verificamos os dados experimentais e obtivemos um novo resultado, que pode ser visto na Figura 3.5. Para a análise da distribuição angular, os cálculos de canais acoplados efetuados utilizando o modelo coletivo precisaram ser renormalizados. Nestes cálculos foram levados em conta dois estados excitados do núcleo ${}^9\text{Be}$, $(5/2^-; E = 2,43 \text{ MeV})$ e $(7/2^-; E = 6,38 \text{ MeV})$ que, juntamente com o estado fundamental $(3/2^-)$ formam uma banda rotacional [2].

As secções de choque inelásticas teóricas para os dois estados excitados foram somadas e transformadas para o sistema de laboratório através de relações cinemáticas com o objetivo de serem comparadas com os dados experimentais (ver Figura 3.11).

Observando a Figura 3.11, apesar do bom acordo entre os dados experimentais e o cálculo teórico, este último superestima a secção de choque experimental por um fator 2 para a energia mais baixa. Este fator é difícil de explicar uma vez que os dados experimentais devem envolver vários processos e desta forma deveriam ser maiores do que um cálculo de canais acoplados (CC) que considera somente dois estados.

Na Tabela 3.3 são apresentadas as secções de choque integradas em ângulo obtidas através da normalização para a produção de partículas- α e para

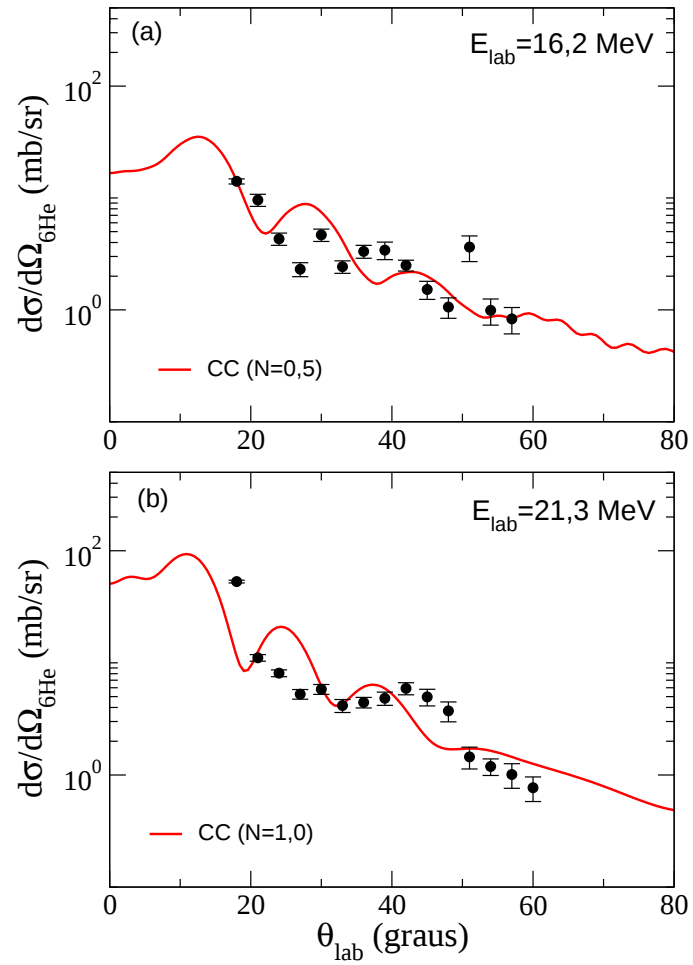


Figura 3.11: Distribuição angular dos eventos inelásticos de ${}^6\text{He}$ em (a) $E_{\text{lab}}=16,2$ MeV e (b) $E_{\text{lab}}=21,3$ MeV.

o espalhamento inelástico.

Tabela 3.3: Secção de Choque Total integrada para os eventos inelásticos de ${}^6\text{He}$ e para a produção de partículas- α na colisão ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$.

$E_{\text{lab}}(\text{MeV})$	$\sigma_{{}^6\text{He}}(\text{mb})$	$\sigma_{\alpha}(\text{mb})$
16,2	17(2)	324(32)
21,3	35(4)	436(44)

3.2.5 Secção de Choque de Reação

A secção de choque total de reação foi obtida da análise do espalhamento ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ nas duas energias, por meio de cálculos de MO, CC e CDCC. Com o objetivo de comparar os resultados obtidos para diferentes sistemas, utilizamos um método simples que remove os efeitos geométricos e de barreira coulombiana (ver Equações 3.6 e 3.7) de modo que é possível comparar secções de choque de reação de diferentes sistemas em diferentes energias [7]:

$$E_{\text{red}}^{\text{cm}} = \frac{E_{\text{cm}}(A_p^{1/3} + A_a^{1/3})}{Z_p Z_a} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{\text{red}}^{\text{cm}} = \frac{\sigma_{\text{reac}}}{(A_p^{1/3} + A_a^{1/3})^2} \quad (3.7)$$

onde E_{cm} é a energia no centro de massa, σ_{reac} é a secção de choque total de reação, $A_{p,a}$ é a massa do projétil e do alvo, respectivamente e $Z_{p,a}$ é o número atômico do projétil e do alvo, respectivamente.

Os resultados estão apresentados na Figura 3.12, que mostra as secções de choque total de reação reduzidas em função das energias reduzidas para o sistema ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ juntamente com sistemas obtidos da literatura, envolvendo núcleos estáveis e radioativos fracamente e fortemente ligados [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. Para o sistema ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ é apresentado o valor médio de $\sigma_{\text{red}}^{\text{cm}}({}^6\text{He})$ e as barras de erro levam em consideração os

diferentes cálculos.

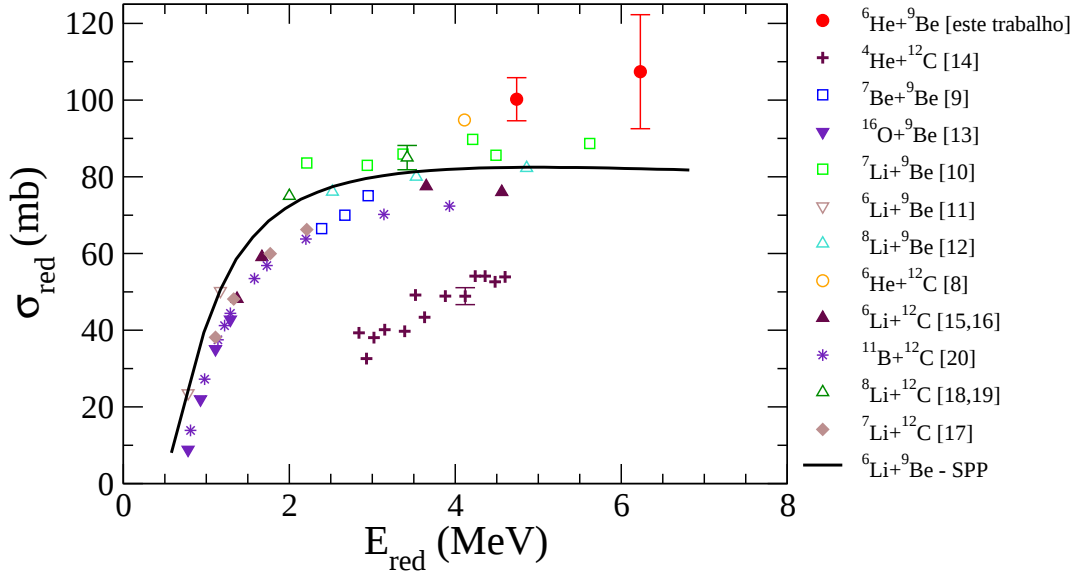


Figura 3.12: Secções de choque total de reação reduzidas para sistemas envolvendo projéteis fracamente e fortemente ligados [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29].

Observando a Figura 3.12, é possível notar que aparentemente há uma primeira faixa envolvendo núcleos fortemente ligados (${}^4\text{He}$) e um pouco acima aparece os resultados obtidos para os sistemas envolvendo projéteis e alvos fracamente ligados. Comparando σ_{red} obtida para os sistemas envolvendo projéteis fracamente ligados como ${}^{6,7,8}\text{Li}$ e ${}^{7,9}\text{Be}$ com σ_{red} obtida para o sistema ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ (ver Figura 3.12), parece que existe um aumento na secção de choque de reação. Nesta figura incluímos os dados do sistema ${}^6\text{He}+{}^{12}\text{C}$ [21], que mostra o mesmo comportamento. Para investigar este ponto com mais detalhe, calculamos a seguinte quantidade:

$$\Delta\sigma(\%) = 100 \cdot \frac{\sigma_{\text{reac}}({}^6\text{He}) - \sigma_{\text{reac}}({}^6\text{Li})}{\sigma_{\text{reac}}({}^6\text{Li})} \quad (3.8)$$

onde $\sigma_{\text{reac}}({}^6\text{He})$ é a secção de choque total de reação envolvendo o núcleo ${}^6\text{He}$, obtida a partir da análise de dados experimentais e $\sigma_{\text{reac}}({}^6\text{Li})$ é a secção de choque total de reação envolvendo o núcleo ${}^6\text{Li}$, obtida através do Po-

tencial de São Paulo (PSP) [30, 31]. Foram selecionados apenas os dados experimentais obtidos em energias $E_{\text{red}} > 1,1$ MeV (Figura 3.12) e os valores para $\sigma_{\text{reac}}({}^6\text{Li})$ foram calculados nas mesmas energias reduzidas. Este é um ponto importante, pois à energias abaixo da barreira Coulombiana, $\sigma_{\text{reac}}({}^6\text{Li})$ cai rapidamente e o aumento torna-se muito pronunciado. A linha sólida apresentada na Figura 3.12 representa uma previsão para o sistema ${}^6\text{Li}+{}^9\text{Be}$ obtida através do PSP.

A Figura 3.13 apresenta $\Delta\sigma(\%)$ em função da massa do alvo. Consideráveis aumentos (60 %) na secção de choque total de reação são observados para o espalhamento do núcleo ${}^6\text{He}$ em alvos pesados, como ${}^{120}\text{Sn}$ [26] e ${}^{208}\text{Pb}$ [24, 28]. Isto é esperado devido a efeitos do *breakup* Coulombiano, que é importante para sistemas envolvendo projéteis halo e alvos pesados em baixas energias. Para o sistema ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$, por outro lado, a situação não é clara e um aumento mais fraco, porém considerável, de cerca de 22(7)% para 16,2 MeV e 31(18)% para 21,3 MeV é visto. Os erros foram obtidos por propagação e levam em consideração os diferentes cálculos (OM, CC, 3b e 4b-CDCC).

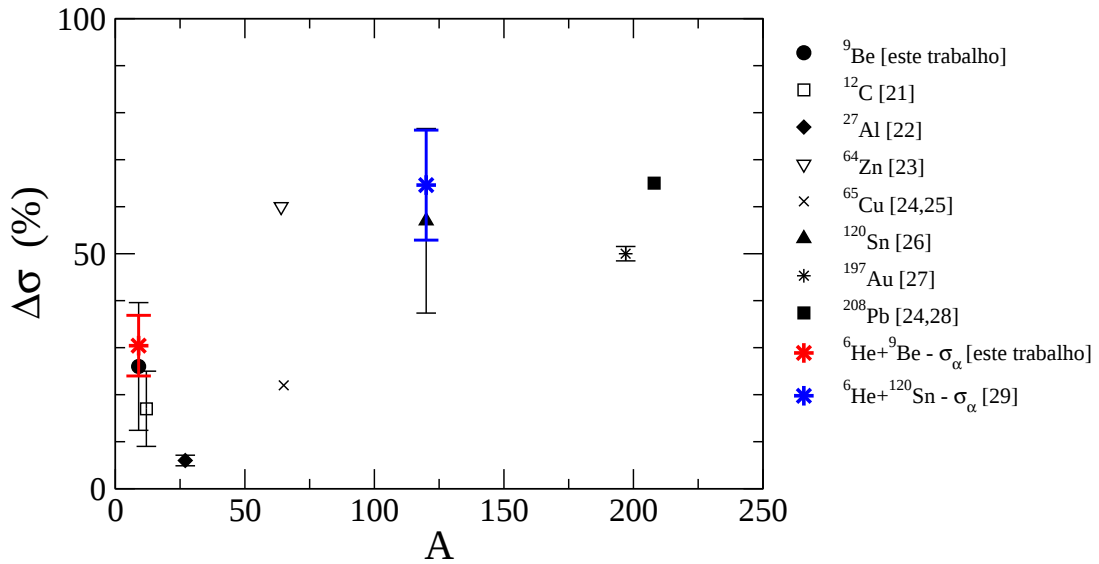


Figura 3.13: Comparação do aumento das secções de choque de reação para diferentes sistemas envolvendo o projétil exótico ${}^6\text{He}$.

Usamos também a secção de choque total integrada em angulo (Tabela 3.3) para calcular $(\sigma_\alpha - \sigma_{\text{inel}})/\sigma(^6\text{Li})$ para os sistemas $^6\text{He}+^9\text{Be}$ e $^6\text{He}+^{120}\text{Sn}$.

Para comparar a secção de choque de produção de partículas- α com os relativos aumentos $\Delta\sigma(\%)$ é necessário subtrair o efeito da excitação do alvo (σ_{inel}) uma vez que este já está presente em $\sigma_{\text{reac}}(^6\text{Li})$ usado na Equação 3.8. Obtivemos 25% e 32% para o sistema $^6\text{He}+^9\text{Be}$ em 16,2 e 21,3 MeV, respectivamente, e cerca de 65% para o sistema $^6\text{He}+^{120}\text{Sn}$ [26]. Os valores médios foram calculados e concordam muito bem com os aumentos observados na secção de choque total de reacção para estes sistemas (ver Figura 3.13).

A produção de partículas- α observada é sistematicamente maior do que o aumento na secção do choque total de reacção. Isto é esperado já que para obtermos σ_α integramos todas as contagens na faixa das partículas- α , o que certamente inclui reacções envolvendo feixes contaminantes que não estão incluídas na secção de choque total de reacção obtida a partir do espalhamento elástico.

3.3 Detector de Nêutrons

Durante o período que compreende o relatório foram obtidos poucos avanços com relação ao funcionamento do detector de nêutrons existente no laboratório Pelletron. Para o funcionamento integral deste detector é necessária uma fonte de alta tensão para alimentação das fotomultiplicadoras. A fonte existente no LAFN (marca: *Caen*) apresentou problemas na placa de controle das tensões e foi encaminhada à empresa fabricante, na Itália, para verificação. A mesma retornou da assistência em meados de 2012 e foram realizados testes para verificação do seu funcionamento. Para isso, colocou-se tensão em cada canal da fonte e com o auxílio de um multímetro, conectado no canal de saída, mediu-se o valor da tensão. Verificou-se com este teste que o valor obtido foi exatamente o valor nominal, como era esperado.

Após isso, foi desenvolvido um programa para testar a aquisição de dados. Os *inputs* deste programa podem ser vistos nas Figuras 3.14 e 3.15,

apresentadas abaixo:

Figura 3.14: Código utilizado para testar a aquisição de dados com o detector de nêutrons (*Prog: neutron.evs*).

```

NSHD=16      ; 16*256 Words ACUMULADOS no Driver ANTES DE SEREM
              ; ENVIADOS AOS CONSUMIDORES (de 1 a 16)

PGM$
;; PROGRAMA DE AQUISICAO DE DADOS
;; DEFINE MODULOS A SEREM UTILIZADOS
;; CONFIGURA MODULOS

      NQ2=3      ; QDC PHILLIPS 7166H
      NQ5=6
      TDC1=15    ; TDC PHILLIPS 7186H
      NLAM=6     ; Look At Me

      NAF NQ2,0,9      ; Clear QDC
      NAF NQ5,0,9      ; Clear QDC

      NAF TDC1,0,9     ; Clear TDC

      NAF NLAM,0,26    ; Enable LAM (PHILLIPS)

      MOV 0,CA        ; PEDESTAL
      A=0
      LOOP 16
        NAF NQ2,0,17
        NAF NQ2,A,20
        NAF NQ5,0,17
        NAF NQ5,A,20

        NAF TDC1,0,17
        NAF TDC1,A,20

      A=A+1
      ENDLLOOP

      MOV 0,CA        ; LOWER THRESHOLD (LLT)
      A=0
      LOOP 16
        NAF NQ2,1,17
        NAF NQ2,A,20
        NAF NQ5,1,17
        NAF NQ5,A,20
        NAF TDC1,1,17
        NAF TDC1,A,20

      A=A+1
      ENDLLOOP

      MOV 4000,CA     ; UPPER THRESHOLD (ULT)
      A=0
      LOOP 16
        NAF NQ2,2,17
        NAF NQ2,A,20
        NAF NQ5,2,17
        NAF NQ5,A,20

        NAF TDC1,2,17
        NAF TDC1,A,20

      A=A+1
      ENDLLOOP

      MOV 15,CA
      NAF NQ2,0,19      ; HABILITA PED., LLT, ULT
      NAF NQ5,0,19      ; HABILITA PED., LLT, ULT
      NAF TDC1,0,19     ; HABILITA PED., LLT, ULT

      ;; INICIO DO LOOP DE EVENTOS

      INIT

      ;; DETECTOR NEUTRONS

      NAF TDC1,1,6
      MOV CA,PAT
      IF(PAT.NONE.[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16])NOEV

      OUT 8001H
      ROUT TDC1,0,0
      ROUT TDC1,1,0
      ROUT NQ2,0,0
      ROUT NQ2,1,0
      ROUT NQ5,0,0
      ROUT NQ5,1,0

      ;; FIM DO EVENTO

      FIM   OUT 0FFFFH

      ;; LIMPA MODULOS E PREPARA PARA PROXIMO EVENTO

      NOEV  NAF NQ2,3,11    ; Clear Hit Register, LAM & Data Register
            NAF NQ5,3,11    ; Clear Hit Register, LAM & Data Register
            NAF TDC1,3,11   ; Clear Hit Register, LAM & Data Register
            NAF NLAM,0,26   ; Enable LAM (PHILLIPS)

      RTRN
      END

```

Figura 3.15: Código utilizado para testar a aquisição de dados com o detector de nêutrons (*Prog: neutron.cxx*).

```

#include "TH2.h"
// #include "iostream.h"
#include "ScanRoot.h"

#define NCELL 1
#define CEL0 0

TH1F* H1[200];
TH2F* H2[200];

int chap1D = 0;
int chap2D = 0;
int fuma1D = 0;
int fuma2D = 0;
int neut1D = 0;
int neut2D = 0;

void fillHistograms(short npar, float *par)
{
    if(npar<=0) return;
    cout<<npar<<endl;

    H1[0]->Fill(par[1]);
    H1[1]->Fill(par[2]);
    H1[2]->Fill(par[3]);
    H1[3]->Fill(par[4]);
    H1[4]->Fill(par[5]);
    H1[5]->Fill(par[6]);
}

void bookHistograms(ScanRoot* spm)
{
    char line[100];
    int index1 = 0;
    int index2 = 0;

    cout <<"booking histograms"<<endl;
    spm->fillHistograms = &fillHistograms; // do NOT remove
    spm->cd();

    TDirectory* dir = spm->getDir();

    chap1D = index1;
    chap2D = index2;

    neut1D = index1;
    neut2D = index2;

    TDirectory* neutron = dir->mkdir("neutron");

    sprintf(line,"h%2d",1);
    H1[0] = new TH1F(line,line,4096,0,4096);
    sprintf(line,"h%2d",2);
    H1[1] = new TH1F(line,line,4096,0,4096);
    sprintf(line,"h%2d",3);
    H1[2] = new TH1F(line,line,1024,0,4096);
    sprintf(line,"h%2d",4);
    H1[3] = new TH1F(line,line,1024,0,4096);
    sprintf(line,"h%2d",5);
    H1[4] = new TH1F(line,line,1024,0,4096);
    sprintf(line,"h%2d",6);
    H1[5] = new TH1F(line,line,1024,0,4096);

    cout <<"Total de histogramas 1D = "<<index1<<endl;
    cout <<"Total de histogramas 2D = "<<index2<<endl;
}

void init()
{
}

void finish()
{
}

```

Os testes de aquisição de dados foram feitos com o auxílio de um pulsador, que foi utilizado para simular o sinal proveniente da fotomultiplicadora. A aquisição dos dados foi feita com o programa SPM-ROOT [32] utilizando os códigos (*neutron.cxx* e *neutron.evs*) apresentados anteriormente. O resultado dos testes constatou o perfeito funcionamento da fonte *Caen* e do programa de aquisição.

Diante disso, testes utilizando uma fonte de nêutrons (AmBe) deverão ser realizados em breve.

Resposta ao Questionamento do Acessor

Pergunta enviada pelo Acessor:

A correção do ângulo médio de detecção apresentada na seção 3.4.3 do seu relatório altera o ângulo efetivo da medida, como mostra o resultado da figura 3.10, onde se observa um deslocamento na horizontal dos pontos no gráfico. No entanto, na figura 3.11, a correção acima referida apresenta um deslocamento também na razão de σ/σ_R com um efeito considerável da ordem de 10 vezes para ângulos pequenos. No relatório isso não é explicado. Como a correção do ângulo efetivo da posição do seu detector muda tanto a seção de choque medida do espalhamento no alvo de Ouro?

Resposta:

Na Figura 3.11 é apresentada uma distribuição angular do espalhamento elástico ${}^6\text{He}+{}^{197}\text{Au}$ em $E_{\text{lab}}=11.9$ MeV. Esta medida foi realizada para ser utilizada para normalização dos dados com alvo de ${}^9\text{Be}$, já que este espalhamento segue o comportamento do espalhamento Rutherford nas energias e ângulos medidos:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_R} = \left(\frac{Z_p Z_a e^2}{4E_{cm}} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta_{cm}}{2}} \quad (4.1)$$

onde Z_p e Z_a são os números atômicos do projétil e do alvo respectivamente, E_{cm} é a energia do projétil no referencial do centro de massa $\left(E_{\text{cm}} = \frac{m_a}{m_a + m_p} E_{\text{lab}}\right)$, e $e^2 \cong 1,44 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$.

Os feixes secundários produzidos no sistema RIBRAS possuem uma divergência angular intrínseca de $1,5^\circ$ - $4,5^\circ$ devido à aceitação de 2° - 6° do solenóide. Além disso, a utilização de detectores com ângulos sólidos grandes é necessária devido à baixa intensidade do feixe secundário. Quando esses detectores são posicionados em um determinado ângulo de detecção θ_{lab} , são detectadas as partículas espalhadas em um determinado intervalo angular $(\theta_{\text{lab}} \pm \Delta\theta)$. Neste intervalo angular, a secção de choque pode variar consideravelmente. Esse fato foi levado em consideração através da correção feita nos dados experimentais utilizando o código computacional de Monte Carlo, chamado RIBRAS I [33]. Esse código simula o feixe secundário sendo espalhado pelo alvo secundário e fornece o ângulo de espalhamento das partículas que chegam ao detector. Para isso, leva em consideração o ângulo sólido do detector, o tamanho e a divergência do feixe secundário e o *straggling* angular experimentado pelo feixe ao atravessar o alvo secundário. Além disso, considera o fato de que partículas espalhadas em diferentes ângulos sólidos obedecem a uma distribuição de probabilidades dada pela Equação 4.1, o que faz aumentar a probabilidade das partículas em ângulos dianteiros, implicando um deslocamento considerável no ângulo médio de detecção nesta região.

Como pode ser visto na Figura 3.11, apresentada no relatório anterior, a correção diminui o ângulo de espalhamento das partículas que chegam no detector. Visto que a quantidade σ_{Ruth} cresce a medida que o ângulo diminui, temos que a relação $\sigma/\sigma_{\text{Ruth}}$ diminui. Ou seja, não é a secção de choque medida experimentalmente que diminui com a correção realizada, e sim a relação $\sigma/\sigma_{\text{Ruth}}$.

Plano de Trabalho

Em nov/2012 foi solicitado o cancelamento da bolsa de pós-doutoramento devido a minha contratação como Professora Adjunta na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPr. A partir deste momento o projeto foi interrompido, porém continuo esse trabalho como colaboradora do *Grupo de Reações Diretas e Nucleos Exóticos* do Departamento de Física Nuclear do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.

Outras análises teóricas da reação ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$, medida em $E_{\text{lab}}=11,8$ MeV, serão realizadas assim como a verificação da redução dos dados experimentais. Além disso, existe a possibilidade de efetuar medidas em energias ainda mais baixas e também utilizando alvos distintos, como por exemplo, ${}^{10,11}\text{B}$.

Atividades Acadêmicas

6.1 Artigos Publicados

Durante o período que compreende o relatório, mai/2012 – nov/2012, o seguinte artigo foi publicado:

1. **The $^8\text{Li}(\text{p},\alpha)^5\text{He}$ reaction at low energies and ^9Be spectroscopy around the proton threshold.**

Physical Review. C. (Nuclear Physics) v.86, 06432183 (2012)

D.R. Mendes Jr., A. Lépine-Szily, P. Descouvemont, R. Lichtenthäler, V. Guimarães, P.N. de Faria, A. Barioni, K.C.C. Pires, V. Morcelle, R. Pampa Condori, M. C. Morais, E. Leistenschneider, C.E.F. Lima, J. C. Zamora, J. A. Alcantara, V. Zagatto, M. Assunção, J.M.B. Shorto.

Além disso, o seguinte artigo foi recentemente submetido à publicação:

1. **Total reaction and α -particle production cross section in the $^6\text{He}+^9\text{Be}$ collisions.**

Submetido à Physical Review C.

K.C.C. Pires, R. Lichtenthäler, A. Lépine-Szily, V. Guimarães, P.N. de Faria, D.R. Mendes Junior, V. Morcelle, A. Barioni, M.C. Morais, E. Leistenschneider, R. Pampa Condori, J.C. Zamora, A.M. Moro, M. Rodríguez-Gallardo, M. Assunção, J.M.B. Shorto.

6.2 Trabalhos Completos Publicados

Durante o período que compreende o relatório, mai/2012 - nov/2012, o seguinte trabalho completo foi publicado:

1. Physics with rare ion beams in Brazil.

AIP Conference Proceedings, 1423, pp. 119-121 (2012)

R. Lichtenthäler, A. Lépine-Szily, V. Guimarães, P.N. de Faria, D. R. Mendes Jr., A. Barioni, K.C.C. Pires, M.C. Moraes, V. Morcelle, and R. Pampa Condori.

Além disso, os seguintes trabalhos completos foram submetidos à publicação:

1. Cluster structures Observed in ^{40}Ca from the $^{12}\text{C}+^{28}\text{Si}$ Scattering.

Submetido à AIP Conference Proceedings - 10th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, Hungria (2012).

E.A. Benjamim, A. Lépine-Szily, J.M. Oliveira Junior, R. Lichtenthäler, L.C. Chamon, V. Guimarães, W. Sciani, R.Y.R. Kuramoto, J. Alcantara-Núñez, A. Barioni, O. Camargo Jr. R. Denke, P.N. de Faria, G.F. Lima, D.R. Mendes Junior, K.C.C. Pires.

2. Experiments with a double Solenoid System: Spectroscopy of ^7He ground state.

Submetido à AIP Conference Proceedings - XXXV Reunião de Trabalhos sobre Física Nuclear no Brasil (2012).

R. Lichtenthäler, R. Pampa Condori, P.N. de Faria, A. Lépine-Szily, D.R. Mendes Jr., K.C.C. Pires, M.C. Moraes, E. Leistenschneider, V.B. Scarduelli, J.M.B. Shorto, M. Assunção, L.R. Gasques.

3. Elastic Scattering Measurements for ${}^7\text{Be}+{}^{27}\text{Al}$ System at RI-BRAS Facility.

Submetido à AIP Conference Proceedings - XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Maresias, São Paulo, Brasil (2012).

V. Morcellea, R.Lichtenthäler, M.C. Morais, A. Lépine-Szily, V.Guimarães, P.R.S. Gomes, J. Lubian, A. Barioni, D.R. Mendes Jr, P.N. de Faria, L.Gasques, J.M.B. Shorto, K.C.C. Pires, J.C. Zamora, R.P. Condori.

6.3 Apresentação de Trabalhos e Participação em Eventos

Durante o período que compreende o relatório, mai/2012 – nov/2012, participei de dois eventos apresentando os seguintes trabalhos:

1. Study of the ${}^6\text{He}, {}^7\text{Be}+{}^9\text{Be}$ reactions at low energies.

13th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna, Itália, 2012.

Apresentação oral.

2. Study of the processes involving the ${}^6\text{He}$ radioactive nucleus.

XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Maresias, São Paulo, Brasil, 2012.

Apresentação em forma de poster.

6.4 Resumos de Trabalhos Publicados em Anais de Eventos

Durante o período que compreende o relatório, mai/2012 – nov/2012, os seguintes resumos de trabalhos foram publicados em anais de eventos:

1. **Radioactive Ion Beams in Brasil (RIBRAS) – Recent results.**

International Nuclear Physics Conference - Nuclear Structure and Dynamics II, Opatija, Croatia, (2012).

A. Lépine-Szily, R. Lichtenthäler, V. Guimarães, D.R. Mendes Jr., E. Leistenschneider, P. Descouvemont, P. N. de Faria, A. Barioni, V. Morcelle, M. C. Morais, K.C.C. Pires, R. Pampa Condori, V. Scarduelli, L. R. Gasquez, J. C. Zamora

2. **Study of the processes involving the ^6He radioactive nucleus.**

XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Maresias, São Paulo, Brasil (2012).

K.C.C. Pires, R. Lichtenthäler, A.Lépine-Szily, V. Guimarães, E. Crema, M.C. Morais, R. Pampa Condori, V.B. Scarduelli, E. Leistenschneider, E. Medeiros, L.M. Fonseca, V. Zagatto, A.M. Moro, M. Rodríguez-Gallardo, D.R. Mendes Jr., V. Morcelle, P. N. de Faria, M. Assunção, T.N. Britos, A. Barioni, J.M.B. Shorto, J.C. Zamora, S. Mukherjee.

3. **Elastic and Inelastic scattering measurement of ^8Li on ^{197}Au .**

XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Maresias, São Paulo, Brasil (2012).

T.N. Britos, M. Assunção, P. Descouvemont, A.Lépine-Szily, R. Lichtenthäler, A. Barioni, D.R. Mendes Jr., D. Pereira, K.C.C. Pires, L.R. Gasques, M.C. Morais, N. Added, P.N. de Faria, R. Pampa Condori, V. B. Scarduelli, V. Zagatto.

4. **Measurements of the $^6\text{He}+p$ resonant scattering.**

XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Maresias, São Paulo, Brasil (2012).

R. Pampa Condori, R. Lichtenthäler, A. Lépine-Szily, M.C. Morais, K.C.C. Pires, V. B. Scarduelli, L.R. Gasques, D. Medeiros, J.A. Alcantara-

Núñez, E. Leistenschneider, P.N. de Faria, D.R. Mendes Jr., J.M.B. Shorto, M. Assunção.

5. Development of light neutron-rich secondary beams with RI-BRAS system.

XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Maresias, São Paulo, Brasil (2012).

V. Guimarães, V.B. Scarduelli, G. Karapetyan, E.S. Rossi Jr., F.M. Melo, D. Medeiros, L.R. Gasques, A. Lépine-Szily, K.C.C. Pires, E. Leistenschneider, D. Pereira, N. Added, P.N. de Faria, D.R. Mendes Jr, A. Arazi.

6. The $^8\text{Li}(\text{p},\alpha)^5\text{He}$ reaction and ^9Be spectroscopy.

XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Maresias, São Paulo, Brasil (2012).

D.R. Mendes Jr., V. Morcelle, A. Lépine-Szily, R. Lichtenthäler, V. Guimarães, P.N. de Faria, K.C.C. Pires, R. Pampa Condori, M.C. Morais, E. Leistenschneider, C.E.F. Lima, P. Descouvemont, M. Assunção, J.M.B. Shorto, A. Barioni.

7. Elastic Scattering Measurements and Reaction Cross Sections for $^6\text{He}+^{58}\text{Ni}$ System.

XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Maresias, São Paulo, Brasil (2012).

V. Morcelle, D.R. Mendes Jr., R. Lichtenthäler, A. Lépine-Szily, V. Guimarães, P.N. de Faria, L.R. Gasques, M.C. Morais, R. Pampa Condori, K.C.C. Pires, V.B. Scarduelli, E. Leistenschneider, V. Zagatto, J.M.B. Shorto, A. Barioni, J.C. Zamora.

8. Recent results in the study of exotic nuclei using the Radioactive Ion Beams in Brasil (RIBRAS) facility.

XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Maresias, São Paulo, Brasil (2012).

A. Lépine-Szily, R. Lichtenthäler, V. Guimarães, J.A. Alcantara-Nuñez, E.A. Benjamim, P.N. de Faria, E. Leistenschneider, L.R. Gasques, M.C. Morais, R. Pampa Condori, K.C.C. Pires, V.B. Scarduelli, J.C. Zamora, D.R. Mendes Jr., V. Morcelle, P. Descouvemont, M. Assunção, A.M. Moro, A. Arazi, A. Barioni.

9. Experiments with a Double Solenoid System.

XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Maresias, São Paulo, Brasil (2012).

R. Pampa Condori, R. Lichtenthäler, P.N. de Faria, A. Lépine-Szily, D.R. Mendes Jr., K.C.C. Pires, M. Assunção, V.B. Scarduelli, E. Leistenschneider, M.C. Morais, J.M.B. Shorto, L.R. Gasques.

10. Reaction Cross Sections and Elastic Scattering Energy Dependence around the Coulomb Barrier for the ${}^7\text{Be}+{}^{27}\text{Al}$ system.

XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Maresias, São Paulo, Brasil (2012).

V. Morcelle, P.R.S. Gomes, J. Lubian, D.R. Mendes Jr., R. Lichtenthäler, V. Guimarães, A. Lépine-Szily, O. Camargo Jr., P.N. de Faria, L.R. Gasques, M.C. Morais, R. Pampa Condori, K.C.C. Pires, V.B. Scarduelli, A. Barioni, J.M.B. Shorto, J.C. Zamora, E.F. Aguilera, E. Martinez-Quiroz, J. Kolata, H. Jiang, F. Becchetti, L.O. Lamm, D. Lizcano.

11. Coulomb Excitation of ${}^8\text{Li}$.

XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Maresias,

São Paulo, Brasil (2012).

M. Assunção, T.N. Britos, P. Descouvemont, A. Lépine-Szily, R. Lichtenthäler, A. Barioni, D. Medeiros, D. Pereira, D.R. Mendes Jr., K.C.C. Pires, L.R. Gasques, M.C. Moraes, N. Added, P.N. de Faria.

6.5 Participação em Projetos de Pesquisa - Experimentos

Durante o período que compreende o relatório, mai/2012 – nov/2012, participei de um experimento realizado no Laboratório Pelletron:

1. Medidas do espalhamento ${}^6\text{He}+p$ e da reação $p({}^6\text{He},\alpha)t$

Aluno de Doutorado: Rubén Pampa-Condori

Orientador: Prof. Dr. Rubens Lichtenthäler Filho

O aluno Rubén Pampa-Condori defendeu sua tese de doutoramento em dez/2012.

BIBLIOGRAFIA

- [1] I. J. Thompson. *Computer Physics Reports* **7**(4), 167 – 212 (1988).
- [2] K. C. C. Pires, R. Lichtenthäler, A. Lépine-Szily, V. Guimarães, P. N. de Faria, A. Barioni, D. R. Mendes Junior, V. Morcelle, R. Pampa Condori, M. C. Morais, J. C. Zamora, E. Crema, A. M. Moro, M. Rodríguez-Gallardo, M. Assunção, J. M. B. Shorto e S. Mukherjee. *Phys. Rev. C* **83**, 064603 (2011).
- [3] A. M. Moro, K. Rusek, J. M. Arias, J. Gómez-Camacho e M. Rodríguez-Gallardo. *Phys. Rev. C* **75**, 064607 (2007).
- [4] C.M. Perey e F.G. Perey. *At. Data and Nucl. Data Tables* **17**, 1 (1976).
- [5] TUNL Nuclear Data Evaluation. Energy Level Diagrams for A=3-20. <http://www.tunl.duke.edu/nucldata/>, Online; Acesso em 12-Jan-2013.
- [6] K.C.C. Pires. *Estudo de Sistemas de Núcleos Exóticos Leves ${}^6\text{He}$, ${}^7\text{Be}$ e ${}^9\text{Be}$* . Tese de Doutorado, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, (2011).
- [7] P. R. S. Gomes e et al. *Physics Letters B* **601**(1-2), 20 – 26 (2004).
- [8] T. Matsumoto, E. Hiyama, K. Ogata, Y. Iseri, M. Kamimura, S. Chiba e M. Yahiro. *Phys. Rev. C* **70**, 061601(R) (2004).
- [9] Verma, S., Das, J. J., Jhingan, A., Kalita, K., Barua, S., Golda, K. S., Madhavan, N., Sugathan, P., Nath, S., Varughese, T., Gehlot, J., Mandal, S., Ranjit, S., Sahu, P. K., John, B., Nayak, B. K., Saxena, A., Datta, S. K. e Singh, R. *Eur. Phys. J. Special Topics* **150**, 75–78 (2007).

-
- [10] J. Cook e K. W. Kemper. *Phys. Rev. C* **31**(5), 1745–1751 (1985).
- [11] P. L. Von Behren, E. Norbeck e G. L. Payne. *Phys. Rev. C* **10**(2), 550–555 (1974).
- [12] S. Mukherjee, N.N. Deshmukh, V. Guimarães, J. Lubian, P.R.S. Gomes, A. Barioni, S. Appannababu, C.C. Lopes, E.N. Cardozo, K.C.C. Pires, R. Lichtenthäler, A. Lépine-Szily, D.S. Monteiro, J.M.B. Shorto, P.N. de Faria, E. Crema, V. Morcelle, M.C. Morais e R. Pampa Condori. *Eur. Phys. J. A* **45**(1), 23–28 (2010).
- [13] Z. E. Switkowski, Wu Shiu-Chin, J. C. Overley e C. A. Barnes. *Nuclear Physics A* **289**(1), 236 – 252 (1977).
- [14] E. B. Carter, G. E. Mitchell e R. H. Davis. *Phys. Rev.* **133**(6B), B1421–B1433 (1964).
- [15] J. E. Poling, E. Norbeck e R. R. Carlson. *Phys. Rev. C* **13**(2), 648–660 (1976).
- [16] D. E. Trcka, A. D. Frawley, K. W. Kemper, D. Robson, J. D. Fox e E. G. Myers. *Phys. Rev. C* **41**(5), 2134–2146 (1990).
- [17] V.V. Parkar, K. Mahata, S. Santra, S. Kailas, A. Shrivastava, K. Ramachandran, A. Chatterjee, V. Jha e P. Singh. *Nuclear Physics A* **792**(3-4), 187 – 200 (2007).
- [18] R. J. Smith, J. J. Kolata, K. Lamkin, A. Morsad, F. D. Becchetti, J. A. Brown, W. Z. Liu, J. W. Jänecke, D. A. Roberts e R. E. Warner. *Phys. Rev. C* **43**(5), 2346–2352 (1991).
- [19] A. Barioni, V. Guimarães, A. Lépine-Szily, R. Lichtenthäler, D. R. Mendes, E. Crema, K. C. C. Pires, M. C. Morais, V. Morcelle, P. N. de Faria, R. P. Condori, A. M. Moro, D. S. Monteiro, J. M. B. Shorto, J. Lubian e M. Assunção. *Phys. Rev. C* **80**(3), 034617 (2009).

-
- [20] L. Jarczyk, B. Kamys, A. Strzałkowski, A. Szczurek, M. Godlewski, J. Lang, R. Müller e J. Sromicki. *Phys. Rev. C* **31**(1), 12–16 (1985).
- [21] T. Matsumoto, T. Egami, K. Ogata, Y. Iseri, M. Kamimura e M. Yahiro. *Phys. Rev. C* **73**, 051602(R) (2006).
- [22] E.A. Benjamim, A. Lépine-Szily, D.R. Mendes Junior e R. Lichtenth' *Physics Letters B* **647**(1), 30 – 35 (2007).
- [23] A. Di Pietro, P. Figuera, F. Amorini, C. Angulo, G. Cardella, S. Cherubini, T. Davinson, D. Leanza, J. Lu, H. Mahmud, M. Milin, A. Musumarra, A. Ninane, M. Papa, M. G. Pellegriti, R. Raabe, F. Rizzo, C. Ruiz, A. C. Shotter, N. Soić, S. Tudisco e L. Weissman. *Phys. Rev. C* **69**, 044613 (2004).
- [24] E. F. Aguilera, I. Martel, A. M. Sanchez-Benitez e L. Acosta. *Phys. Rev. C* **83**, 021601 (2011).
- [25] A. Chatterjee, A. Navin, A. Shrivastava, S. Bhattacharyya, M. Rejmund, N. Keeley, V. Nanal, J. Nyberg, R. G. Pillay, K. Ramachandran, I. Stefan, D. Bazin, D. Beaumel, Y. Blumenfeld, G. de France, D. Gupta, M. Labiche, A. Lemasson, R. Lemmon, R. Raabe, J. A. Scarpaci, C. Simenel e C. Timis. *Phys. Rev. Lett.* **101**, 032701 (2008).
- [26] P. N. de Faria, R. Lichtenthäler, K. C. C. Pires, A. M. Moro, A. Lépine-Szily, V. Guimarães, D. R. Mendes, A. Arazi, M. Rodríguez-Gallardo, A. Barioni, V. Morcelle, M. C. Morais, O. Camargo, J. Alcantara Nuñez e M. Assunção. *Phys. Rev. C* **81**, 044605 (2010).
- [27] K. Rusek, I. Martel, J. Gómez-Camacho, A. M. Moro e R. Raabe. *Phys. Rev. C* **72**(3), 037603 (2005).
- [28] A. M. Sánchez-Benítez et al. *Nucl. Phys.* **A803**, 30 (2008).

-
- [29] P. N. de Faria, R. Lichtenthäler, K. C. C. Pires, A. M. Moro, A. Lépine-Szily, V. Guimarães, D. R. Mendes, A. Arazi, A. Barioni, V. Morcelle e M. C. Morais. *Phys. Rev. C* **82**(3), 034602 (2010).
- [30] L. C. Chamon, B. V. Carlson, L. R. Gasques, D. Pereira, C. De Conti, M. A. G. Alvarez, M. S. Hussein, M. A. Cândido Ribeiro, E. S. Rossi e C. P. Silva. *Phys. Rev. C* **66**(1), 014610 (2002).
- [31] L. C. Chamon, D. Pereira, M. S. Hussein, M. A. Cândido Ribeiro e D. Galetti. *Phys. Rev. Lett.* **79**(26), 5218–5221 (1997).
- [32] A.A.P. Suaide. Programas graficos de aquisicao e analise baseados no ROOT, <http://www.dfn.if.usp.br/suaide>.
- [33] R. Lichtenthaler. *Codigo Fortran RIBRAS*. **Nao publicado**. (2005).

Anexo 1

Cópia do artigo submetido, recentemente, à publicação na *Physical Review C*.

Total reaction and α -particle production cross-section in the ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ collision

K.C.C. Pires

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, PR 86300-000, Brazil.

R. Lichtenthäler, A. Lépine-Szily, V. Guimarães, P.N. de Faria,*

M.C. Morais, E. Leistenschneider, R. Pampa Condori, and J.C. Zamora†

Departamento de Física Nuclear, Universidade de São Paulo, C.P. 66318, 05389-970, São Paulo, Brazil.

A.M. Moro and M. Rodríguez-Gallardo

Departamento de FAMN, Facultad de Física, Universidad de Sevilla, Apdo. 1065, E-41080 Sevilla, Spain.

D.R. Mendes Junior and V. Morcelle

Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Niterói, R.J. 24210-340, Brazil.

A. Barioni

Departamento de Física da Terra e do Meio Ambiente, Instituto de Física,

Universidade Federal da Bahia, Campus Ondina, BA 40210-340, Brazil.

M. Assunção

Departamento de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de São Paulo,

Campus Diadema, 09972-270, São Paulo, Brazil.

J.M.B. Shorto

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN),

Comissão Nacional de Energia Nuclear, São Paulo, Brazil.

Experimental cross sections of the elastic, inelastic scattering and α -particle production in the ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ collision have been measured at two bombarding energies: $E_{\text{lab}}=16.2$ MeV and 21.3 MeV. The angular distributions have been analysed in the context of several theoretical models. The angle integrated cross sections for the inelastic scattering and the ${}^9\text{Be}({}^6\text{He},\alpha)$ reaction have been obtained and are compared with the total reaction cross section, obtained from the elastic scattering angular distributions. A comparison between the total reaction and α -particle production cross sections for the exotic ${}^6\text{He}$ and the stable ${}^6\text{Li}$ projectiles is presented.

PACS numbers: **21.45.-v, 24.10.-i, 24.10.Ht, 24.10.Eq, 24.50.+g, 25.60.-t, 27.20.+n**

I. INTRODUCTION

Low energy reactions induced by exotic neutron halo projectiles such as ${}^6\text{He}$ have been investigated over the last years [1–5]. The values of the total reaction cross sections obtained with ${}^6\text{He}$ are, in many cases, larger than the ones obtained in experiments with stable projectiles of comparable masses and energies such as ${}^6,7\text{Li}$ and ${}^9\text{Be}$. At the same time, the particle identification spectra of those experiments present a high yield of α -particles produced in the collisions induced by ${}^6\text{He}$. In the case of heavy systems such as the ${}^6\text{He}+{}^{120}\text{Sn}$ [5], the energy distribution of the α -particles indicates that they are more probably originated from direct reactions, such as neutron transfer and projectile breakup, rather than in fusion-evaporation via complete compound nucleus formation. For heavy targets, the Coulomb field is strong

and the total breakup cross section is the result of the coherent sum of the Coulomb [6] and nuclear amplitudes. For light targets, on the other side, the Coulomb contribution becomes negligible and the nuclear force dominates. The extension of those experiments to lighter targets is desirable in order to study the effect of processes occurring in the short range nuclear field separated from those occurring in the long range Coulomb field of heavy and medium mass targets.

For the ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ system an additional complication arises from the fact that the ${}^9\text{Be}$ target is weakly bound and breaks into a neutron and a ${}^8\text{Be}$ at the excitation energy of 1.67 MeV. As the ${}^8\text{Be}$ is unbound, it will subsequently decay in two α -particles. The first excited state of ${}^9\text{Be}$ is located at $E_x = 1.68$ MeV, just above the neutron threshold and, as a consequence, any excitation of the ${}^9\text{Be}$ target would eventually imply its dissociation in one neutron and two α -particles. This complicates enormously the theoretical description of the ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ reaction. There are no available theories capable of describing simultaneously the coupling to the breakup of projectile and target and the problem has to be treated separately

* Present address: Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Niterói, R.J. 24210-340, Brazil.

† Present address: TU Darmstadt, Germany.

in the contexts of the CDCC (Continuum Discretized Coupled Channels) and CC (Coupled Channels) theories for the projectile breakup and target excitation respectively.

Here, experimental results of ${}^6\text{He}$ radioactive beam on ${}^9\text{Be}$ target are presented. We observed a high yield of α -particles produced in the ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ collision. Their energy and angular distribution have been analysed and are compared with theoretical calculations considering the ${}^6\text{He}$ breakup.

In addition, a strip of events along the ${}^6\text{He}$ line with energies lower than that of the elastic scattering has been observed in the two-dimensional spectra with the ${}^9\text{Be}$ target. Those events should correspond to the inelastic excitations of the ${}^9\text{Be}$ target. Their energy and angular distributions have been obtained and are compared with Coupled Channels (CC) calculations considering the ${}^9\text{Be}$ excitation. As the excited states of the ${}^9\text{Be}$ are all unbound one can consider those events as a measurement of the target breakup. The angle integrated cross sections have been obtained and are compared with the total α -particle production cross sections.

Finally, the results of Optical Model analysis for the elastic scattering angular distributions of ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ [7] are presented. The total reaction cross sections, obtained from the optical model, coupled channels and CDCC analysis for the ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ elastic distributions, are re-scaled and presented in a plot together with other stable and exotic systems of similar masses.

II. EXPERIMENTAL RESULTS

The experiment was performed in the São Paulo Pelletron Accelerator using the RIBRAS system [8, 9]. A ${}^7\text{Li}$ primary beam of energies $E_{\text{lab}}=22.1$ and 26.1 MeV and intensity of $I \approx 200$ nAe was used to produce the ${}^6\text{He}$ secondary beam by the ${}^9\text{Be}({}^7\text{Li}, {}^6\text{He}){}^{10}\text{B}$ reaction in the primary target of RIBRAS. A $12\mu\text{m}$ ${}^9\text{Be}$ foil was used as primary target. The selection of the secondary beam was performed by the first solenoid of RIBRAS. Four $E(1000\mu\text{m})$ - $\Delta E(20\mu\text{m})$ telescopes formed by silicon detectors have been mounted in the intermediate scattering chamber to detect and identify the reaction products. A run with a telescope placed at zero degrees was performed initially, using the fainted direct beam. The two-dimensional (ΔE - E) spectrum can be seen in Figure 1. The secondary beam contaminations are ${}^7\text{Li}^{2+}$, from the primary beam, and a higher energy peak of α -particles ($E_\alpha = 1.5E_{{}^6\text{He}}$) produced in reactions with the primary target. Adjacent runs with ${}^9\text{Be}$ and ${}^{197}\text{Au}$ targets have been performed during the whole experiment in order to normalize the data and monitor the secondary beam intensity.

The ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ angular distributions have been measured in the $\theta_{\text{lab}} = 15^\circ - 60^\circ$ angular range with steps of 3° [7, 10, 11].

In Figure 2 we show the spectra obtained with both

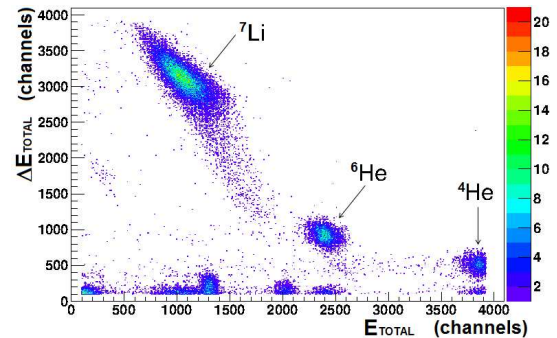


Figure 1. (Color online) Biparametric spectrum obtained with ${}^6\text{He}$ beam without target at $\theta_{\text{lab}} = 0^\circ$.

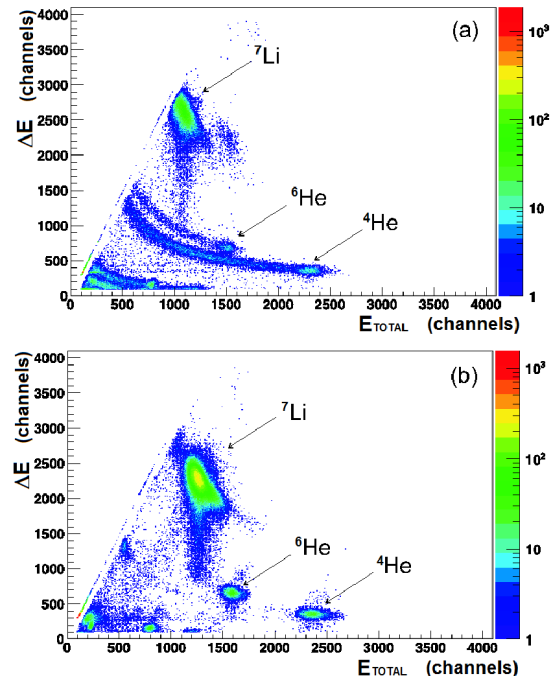


Figure 2. (Color online) Biparametric spectra obtained with ${}^6\text{He}$ beam and (a) ${}^9\text{Be}$, (b) ${}^{197}\text{Au}$ targets at $\theta_{\text{lab}} = 15^\circ$.

targets at $\theta_{\text{lab}} = 15^\circ$. A broad energy distribution of α -particles is clearly seen in the spectrum obtained with ${}^9\text{Be}$ target, which is not present in the spectrum with the gold target. In addition, a strip of ${}^6\text{He}$ particles with energies lower than the elastic peak is observed with the ${}^9\text{Be}$ target. The possibility that those events could be originated by energy degraded ${}^6\text{He}$ beam is ruled out by the fact that they are not seen in the gold target spectrum (Figure 2b). Thus we suppose that they are produced in inelastic collisions with the excitation of the ${}^9\text{Be}$ target.

In Figure 3 we plot the energy distribution of the events in the ${}^6\text{He}$ and α -particle lines. The ${}^6\text{He}$ events are plotted as a function of the ${}^9\text{Be}$ excitation energy instead of particle energy itself considering the kinematics of the ${}^9\text{Be}({}^6\text{He}, {}^6\text{He}){}^9\text{Be}^*$ reaction. By doing this, one is able to sum up all the runs at different angles and improve

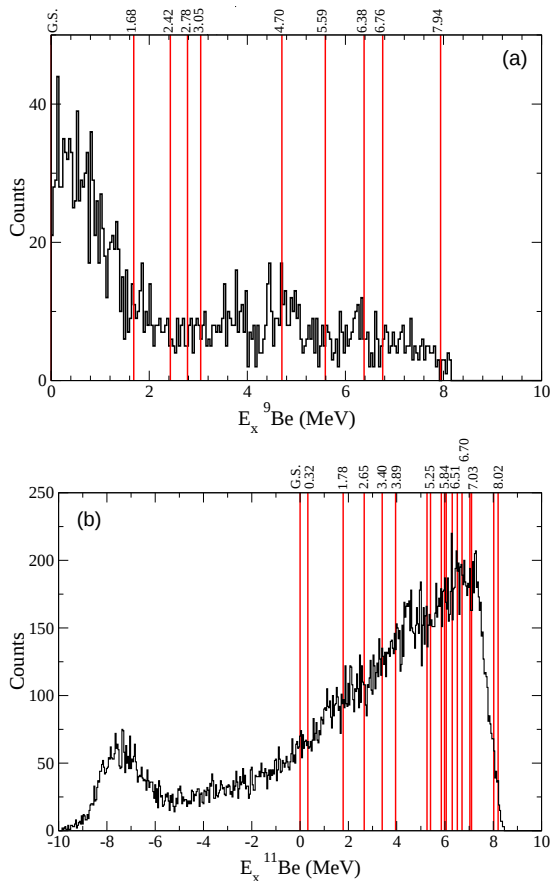


Figure 3. (Color online) Energy distribution of the events in the (a) ${}^6\text{He}$ and (b) α -particle lines. The vertical lines corresponding to the positions of the (a) ${}^9\text{Be}$ and (b) ${}^{11}\text{Be}$ excited states [12]. In particular, in the α -particle distribution (b), we indicate only some states of the ${}^{11}\text{Be}$ nucleus due to the large amount of them.

statistics. The peak at $E_x = 0$ corresponds to the elastic scattering peak. We plot vertical lines at the positions corresponding to the ${}^9\text{Be}$ excited states. Despite the improved statistics no clear peaks are seen at those positions.

The α -particle line is plotted in Figure 3b, as a function of the ${}^{11}\text{Be}$, using the kinematics of the ${}^9\text{Be}({}^6\text{He}, \alpha){}^{11}\text{Be}$ neutron transfer reaction. The peak at negative excitation energies corresponds to the α -particle contaminant beam. No clear peaks are seen near to the ground state of ${}^{11}\text{Be}$ ($E_x = 0$ MeV) and most of the events are concentrated in a high excitation energies region around $E_x = 4 - 8$ MeV, indicating that processes, such as the projectile breakup or neutron transfers to highly excited states of the target, may be playing a role. For the two-neutron transfer reaction considered above $Q_{\text{reac}} = +6.34$ MeV and as the $Q_{\text{optimum}} \approx 0$ for neutron transfers, one would expect most states to be populated at a high ${}^{11}\text{Be}$ excitation energy around $E_x = 6.34$ MeV [5].

As the next step in the analysis, the cross sections for the ${}^6\text{He}$ inelastic and the α -particles distributions were

obtained. This was performed by integrating the counts in the whole energy interval $[E_{\text{min}}, E_{\text{max}}]$ where E_{min} stands for the lower energy limit of the spectra, with 1.8 MeV for the ${}^6\text{He}$ and -5.5 MeV for the α -particles (see Figure 3). Those intervals exclude the elastic scattering peak in the ${}^6\text{He}$ line and the peak of the α -particle contaminating beam. The runs with gold target provided the absolute normalization of the cross sections as described in detailed in Ref. [7]. The resulting angular distributions are plotted as a function of the laboratory angles in Figures 4 and 5.

III. ANALYSIS OF THE ANGULAR DISTRIBUTIONS

A. ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ inelastic scattering

The first step in the analysis was to perform coupled channels calculations for the inelastic events. We have used the collective model to take into account the excitations of two excited states of ${}^9\text{Be}$, ($5/2^-; E = 2.43$ MeV) and ($7/2^-; E = 6.38$ MeV) which together with the ground state ($3/2^-$) form a rotational band. More details of the potentials and deformation parameters used in this calculation can be found in Ref. [7]. The theoretical inelastic cross sections for the two excited states have been transformed to the laboratory system by proper kinematic transformations and have been summed up to be compared with the experimental data. The results are shown in Figure 4. One sees that the slope of the angular distributions are quite well reproduced. The normalization of the calculation in the higher energy is $N = 1$ however, at the lower energy, the calculations overestimate the experimental cross sections by a factor of two. This factor is difficult to explain since the experimental data are very inclusive and should be larger than the simple two level CC calculation. In addition, the normalizations are quite different at the two energies indicating that the energy dependence of the data is different of the calculation. In Table 1 we present the normalized angle integrated inelastic cross sections at the two energies. We performed a test by slightly changing the lower limit of integration in energy spectrum from $E_{\text{min}} = 1.8$ MeV to 1.6 MeV and the effect in the cross section was an increase of about 20%. This small variation would not explain the normalization factor $N = 0.5$ of the lower energy.

B. α -particle events

In Figure 5, the experimental α -particle distribution is compared with the results of 3b-CDCC calculations for the projectile breakup from Ref. [7]. The breakup cross sections for all bins have been integrated and transformed to the laboratory system before comparing with the data. We see that the agreement in the shape is reasonable

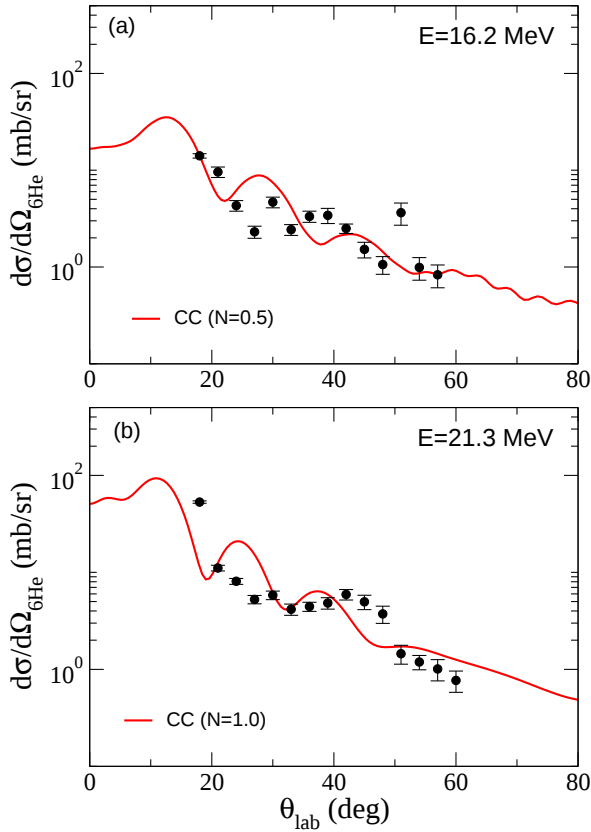


Figure 4. (Color online) Angular distributions for ${}^6\text{He}$ inelastic events at (a) $E_{\text{lab}}=16.2$ MeV and (b) $E_{\text{lab}}=21.3$ MeV.

Table I. Total angle integrated cross sections for ${}^6\text{He}$ inelastic and α -particle production in the ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ collision.

$E_{\text{lab}}(\text{MeV})$	$\sigma_{\text{inel}}(\text{mb})$	$\sigma_{\alpha}(\text{mb})$
16.2	17(2)	324(32)
21.3	35(4)	436(44)

and normalization factors of $N = 1.3$ for the lower and $N = 2.5$ for the higher energies are necessary to reproduce the data. This is a reasonable result since the data are quite inclusive and probably have contribution from other reactions involving the contaminating beams.

In Table I we present the angle integrated cross sections obtained from the total normalized α -particle production and for the inelastic scattering.

C. Elastic Scattering

We performed optical model fits of the elastic scattering angular distributions where the ${}^6\text{He}$ nucleus was considered as a two-body system ($\alpha+2n$) and the projectile-target effective interaction was calculated using the

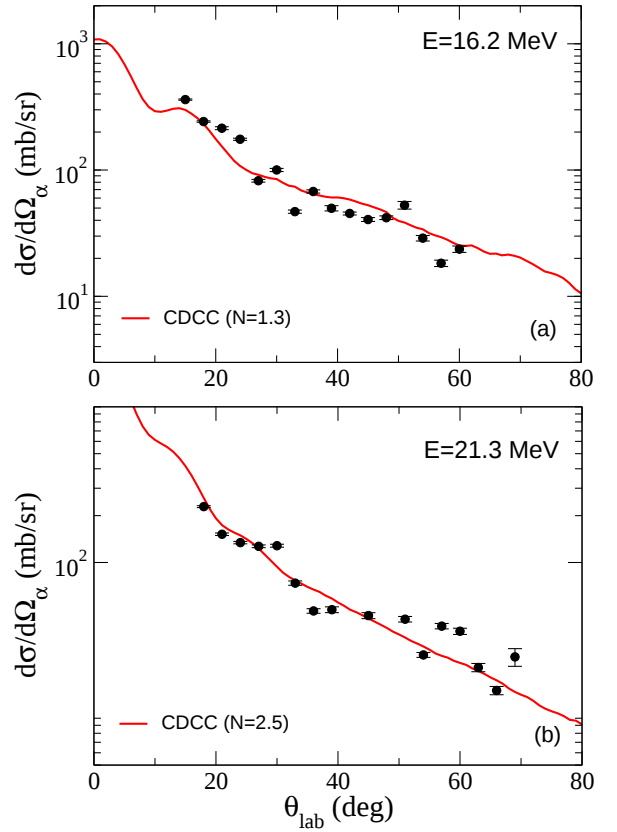


Figure 5. (Color online) Angular distributions for α -particle events at (a) $E_{\text{lab}}=16.2$ MeV and (b) $E_{\text{lab}}=21.3$ MeV.

folded potential given below:

$$V_{\text{opt}} = \langle \phi_{6\text{He}} | V_{[2n+{}^9\text{Be}]} + V_{[\alpha+{}^9\text{Be}]} | \phi_{6\text{He}} \rangle \quad (1)$$

where $\phi_{6\text{He}}$ is the ground state wavefunction of the ${}^6\text{He}$ and was calculated in the single particle model considering the two neutrons as a single particle bound in the $(2n-\alpha)$ state [13]. For the α - ${}^9\text{Be}$ system we used the Wood-Saxon potential from the literature [14] as shown in Table II. For the $(2n-{}^9\text{Be})$ we used a Wood-Saxon shape form factor whose parameters have been adjusted to reproduce the data. All the calculations have been performed using the computer code SFRESCO, part of the code FRESKO [15]. The idea here is to separate the ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ optical potential in two components, one due to the α - ${}^9\text{Be}$ which is known from previous measurements and the other component the unknown $2n+{}^9\text{Be}$ potential due to the neutron halo. The parameters of the latter have been freely varied to reproduce the data.

The results are shown in Figure 6 by the solid and dashed lines and the resulting parameters for the $(2n-{}^9\text{Be})$ potential are shown in Table II. The optical model calculations present oscillations which have been smoothed considering the angular resolution of the experiment as explained in Ref. [7]. The calculation without the smoothing is represented by dotted line. Overall, the

Table II. Parameters obtained from the Optical Model calculations. The calculation was performed with the folded potential (equation 1) using the parameters given below.

E_{lab}	Potencial	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	a_0 (fm)	W_0 (MeV)	r_i (fm)	a_i (fm)	σ_{reac} (mb)	Ref.
	$\alpha+{}^9\text{Be}$	50.00	1.85	0.55	2.50	1.85	0.55	-	[14]
	$2n+\alpha$	96.06	1.90	0.25	-	-	-	-	[13]
16.2	$2n+{}^9\text{Be}$	61.01	1.51	0.55	20.00	1.20	1.01	1513	-
21.3	$2n+{}^9\text{Be}$	21.41	1.51	0.54	10.02	1.35	1.56	1944	-

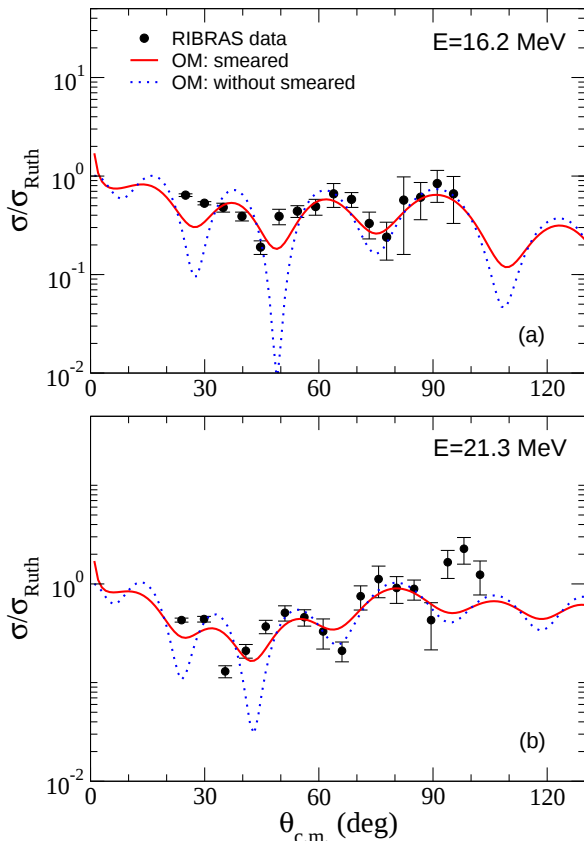


Figure 6. (Color online) Elastic scattering angular distribution for ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ at (a) $E_{\text{lab}} = 16.2$ MeV and (b) $E_{\text{lab}} = 21.3$ MeV. The solid circles are the data and the solid and dashed lines are the results of the the optical model calculations using the folded potential show in Table II. These calculations have been convoluted with the experimental resolution [7] and for comparison we also present the calculation without smooth (dotted line).

OM calculations reproduce well the shape of the experimental data.

D. Total Reaction Cross Section

In order to compare different systems, the total reaction cross sections obtained from the present OM, and previous CC, 3b- and 4b-CDCC analysis [7] have been

reduced using the relations below [16, 17]:

$$\sigma_{\text{red}} = \frac{\sigma_{\text{exp}}}{(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})^2} \quad (2)$$

$$E_{\text{red}} = \frac{E_{\text{cm}}(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})}{Z_1 Z_2} \quad (3)$$

The goal of the reduction procedure is to allow comparison among the cross sections of systems of different masses at different energies in a same plot. This is done by rescaling the cross sections and energies, taking into account the size and the different Coulomb energies.

The reduced values have been averaged over the different calculations (OM, CC, 3b and 4b-CDCC) and are plotted in Figure 7 with an error bar which comprises all the calculations included in the average. In this figure we compare the results for ${}^6\text{He}$ and several other stable light projectiles on ${}^{12}\text{C}$ and ${}^9\text{Be}$ targets [18–30]. It is clearly seen that systems involving the ${}^6\text{He}$ nucleus present a much higher reduced reaction cross section when compared to the stable double magic ${}^4\text{He}$ nucleus. The question now lies in the comparison between the ${}^6\text{He}$ and other weakly bound ${}^{6,7,8}\text{Li}$ and ${}^{7,9}\text{Be}$ projectiles. Is there any enhancement in the total reaction cross section or not and how it depends on the mass of the target?

Albeit the dispersion in Figure 7, there seems to be as sizeable enhancement effect. In this figure we also include the data of the ${}^6\text{He}+{}^{12}\text{C}$ system [30], which shows the same behavior.

In order to investigate this point in more detail, we calculated the following quantity:

$$\Delta\sigma(\%) = 100 \frac{\sigma_{\text{reac}}({}^6\text{He}) - \sigma_{\text{reac}}({}^6\text{Li})}{\sigma_{\text{reac}}({}^6\text{Li})} \quad (4)$$

where $\sigma_{\text{reac}}({}^6\text{He})$ is the total reaction cross section induced by ${}^6\text{He}$, obtained from elastic scattering experiments for several systems [1–4, 30–35]. We selected only experimental data taken at energies ($E_{\text{red}} > 1.1$ MeV) and the ratios have been calculated at the same reduced energies. This is an important point since at energies below the Coulomb barrier $\sigma_{\text{reac}}({}^6\text{Li})$ drops down rapidly and the enhancement effect becomes much more pronounced. For $\sigma_{\text{reac}}({}^6\text{Li})$ we performed optical model cal-

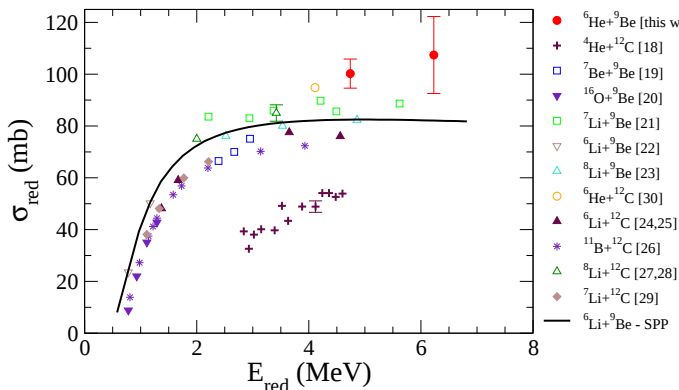


Figure 7. (Color online) Reduced total reaction cross section for different systems induced by exotic, weakly and strongly bound projectiles.

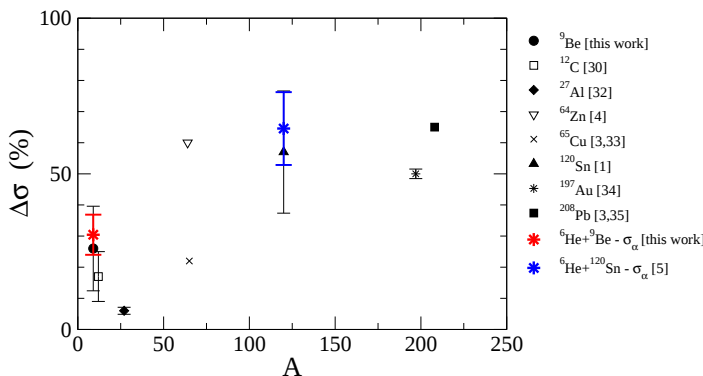


Figure 8. (Color online) Comparison of enhancements in the total reaction cross section for different systems induced by ^6He .

culations using the standard São Paulo potential (SPP) [36, 37] and the results are shown in Figure 7 by the solid line.

In Figure 8 we plot $\Delta\sigma(\%)$ as a function of the mass of the target. Considerable enhancements (60%) in the total reaction cross section are observed for ^6He scattering on heavier targets such as ^{120}Sn [1] and ^{208}Pb [3, 35]. This is expected due to the effect of the Coulomb breakup which is important for halo projectiles and heavy targets at low energies. For $^6\text{He}+^9\text{Be}$, on the other side, the situation is not clear and a weaker but sizeable enhancement of about $\Delta\sigma = 22(7)\%$ for 16.2 MeV and 31(18)% for 21.3 MeV is seen. The errors are due to the spread in the reactions cross sections obtained from different calculations (OM, CC, 3b and 4b-CDCC) which were used in the average.

One possible explanation for the observed enhancements lies in the characteristics of the dynamic polarization potential (DPP) generated by the coupling with the breakup channel [39]. The DPP is localized in the surface region and its imaginary part has a long range tail due to the neutron halo of the ^6He projectile. It is expected that the long range imaginary part of the DPP

would have important effects in the reaction cross section since it spreads to a space region where the elastic wave function is large. This is seen in Table II where the imaginary part of the $2n+^9\text{Be}$ potential presents a very large diffuseness. Thus we expect the effect of the enhancement in the total reaction cross section to be larger in situations where the DPP plays an important role and the coupling between elastic and breakup channels is strong. This seems to be the case for the $^6\text{He}+^9\text{Be}$ system. For the $^8\text{B}+^{12}\text{C}$ system, on the other side, CDCC calculations have shown that the coupling between breakup and elastic scattering is not important and could explain the absence of the enhancement in the total reaction cross section for this system [40].

We also used the total angle integrated cross section of Table I to calculate $(\sigma_\alpha - \sigma_{\text{inel}})/\sigma(^6\text{Li})$ for $^6\text{He}+^9\text{Be}$ and $^6\text{He}+^{120}\text{Sn}$ systems. To compare the alpha production cross section with the relative enhancements $\Delta\sigma(\%)$ it is necessary to subtract the effect of the target excitation σ_{inel} since it is already included in $\sigma_{\text{reac}}(^6\text{Li})$ used in Eq. 4. We obtained 25% and 32% for $^6\text{He}+^9\text{Be}$ at 16.2 and 21.3 MeV, respectively, and about 65% for $^6\text{He}+^{120}\text{Sn}$ system [1].

These values have been averaged and are plotted in Figure 8. They agree very well with the observed enhancements in the total reaction cross section for these systems. The observed α productions is systematically a little larger than the enhancement in the total reactions cross section. That is expected since to obtain σ_α we integrate all counts in the α -particle line what would certainly include reactions from contaminant beams which are not included in the reaction cross section obtained from the elastic scattering.

IV. CONCLUSIONS

Elastic, inelastic scattering and α -particle angular distributions for the $^6\text{He}+^9\text{Be}$ collision are presented at two energies above the Coulomb barrier. The experimental angular distributions have been analysed using several theoretical models and the angle integrated cross sections for the inelastic scattering and α -particles production have been obtained. A comparison between the total reaction cross section, obtained from the elastic scattering, and the angle integrated cross sections for the inelastic and α -particle distributions has been performed. The angle integrated α -particle production cross section accounts for about 20 – 25% of the total reaction cross section for the $^6\text{He}+^9\text{Be}$ system, the latter obtained independently from the analysis of the elastic angular distributions. This number contrasts with the result obtained for the heavier system $^6\text{He}+^{120}\text{Sn}$ [5] where the α -particle production cross section accounts for about 60% of the total reaction cross section.

The angle integrated cross sections for the inelastic excitations of the target are much smaller and account for only 1 – 2% of the total reaction cross section.

A comparison among the total reaction cross sections obtained from the elastic scattering of several stable projectiles and ${}^6\text{He}$ on light targets shows a significant relative enhancement for reactions induced by ${}^6\text{He}$ when compared to the stable ${}^6\text{Li}$ isobar. This enhancement is prominent for heavy targets but still persists for light targets where the Coulomb breakup is negligible. The total α -particle production cross sections, obtained independently in the first part of the analysis, matches quite well those enhancements for the ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ and ${}^6\text{He}+{}^{120}\text{Sn}$ systems.

Acknowledgements

This work was performed while being a PhD stu-

dent and later as a postdoctoral researcher at Universidade de São Paulo. The authors wish to thank the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) and Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for financial support. This work has been partially supported by the Complementary Action PCI2006-A7-0654, funded by the Spanish Ministry of Education and Science. A.M.M. and M.R.G. acknowledge the support by Spanish Ministerio de Ciencia e Innovación under project FPA2006-13807-c02-01, local government of Junta de Andalucía under the excellence project P07-FQM-02894 and the Spanish Consolider-Ingenio 2010 Programme CPAN (CSD2007-00042).

-
- [1] P.N. de Faria and *et al.*, Phys. Rev. C **81**, 044605 (2010).
 - [2] E. F. Aguilera and *et al.*, Phys. Rev. C **79** 021601(R) (2009).
 - [3] E. F. Aguilera, I. Martel, A. M. Sánchez-Benítez and L. Acosta, Phys. Rev. C **83** 021601(R) (2011).
 - [4] A. Di Pietro and *et al.*, Phys. Rev. C **69**, 044613 (2004).
 - [5] P.N. de Faria and *et al.*, Phys. Rev. C **82**, 034602 (2010).
 - [6] M.S. Hussein, R. Lichtenthäler, F.M. Nunes, I.J. Thompson, Phys. Lett. B **640**, 91 (2006).
 - [7] K. C. C. Pires and *et al.*, Phys. Rev. C **83**, 064603 (2011).
 - [8] R. Lichtenthäler and *et al.*, Eur. Phys. J. A **25**, s01, 733 (2005).
 - [9] R. Lichtenthäler and *et al.*, Nucl. Phys. News **15**, 25 (2005).
 - [10] K. C. C. Pires and *et al.*, AIP Conf. Proc. **1231**, 173 (2010).
 - [11] K. C. C. Pires and *et al.*, CERN-Proceedings-2010-001, "12th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms", (2010).
 - [12] Energy Levels for Light Nuclei, A=3-20. Nuclear Data Evaluation Project, TUNL: <http://www.tunl.duke.edu/nucldata/>
 - [13] A.M. Moro, K. Rusek, J.M. Arias, J. Gómez-Camacho and M. Rodríguez-Gallardo, Phys. Rev. C **75**, 064607 (2007).
 - [14] C.M. Perey and F.G. Perey, At. Data and Nucl. Data Tables **17**, 1 (1976).
 - [15] I.J. Thompson, Comp. Phys. Rep **7**, 167 (1988).
 - [16] P.R.S. Gomes and *et al.*, Phys. Lett. B **601**, 20 (2004).
 - [17] P.R.S. Gomes, J. Lubian, I. Padron, R. M. Anjos, Phys. Rev. C **71**, 017601 (2005).
 - [18] E. B. Carter, G. E. Mitchell, R. H. Davis, Phys. Rev. B **133**, B1421 (1964).
 - [19] S. Verma and *et al.*, Eur. Phys. J. Special Topics **150**, 75 (2007).
 - [20] Z. E. Switkowski, Wu Shiu-Chin, J. C. Overley, C. A. Barnes, Nuclear Physics A **289**, 236 (1977).
 - [21] J. Cook, K. W. Kemper, Phys. Rev. C **31**, 1745 (1985).
 - [22] P. L. Von Behren, E. Norbeck, G. L. Payne, Phys. Rev. C **10**, 550 (1974).
 - [23] S. Mukherjee and *et al.*, Eur. Phys. J. A **45**, 23 (2010)
 - [24] J. E. Poling, E. Norbeck and R. R. Carlson, Phys. Rev. C **13**, 648 (1976).
 - [25] D. E. Trcka, A. D. Frawley, K. W. Kemper, D. Robson, J. D. Fox and E. G. Myers, Phys. Rev. C **41**, 2134 (1990).
 - [26] L. Jarczyk, B. Kamys, A. Strzalkowski, A. Szczurek, M. Godlewski, J. Lang, R. Müller, J. Sromicki, Phys. Rev. C **31**, 12 (1985).
 - [27] R. J. Smith, J. J. Kolata, K. Lamkin, A. Morsad, K. Ashktorab, F. D. Becchetti, J. A. Brown, J. W. Janecke, W. Z. Liu and D. A. Roberts, Phys. Rev. C **43**, 761 (1991).
 - [28] A. Barioni and *et al.*, Phys. Rev. C **80**, 034617 (2009).
 - [29] V.V. Parkar and K. Mahata and S. Santra and S. Kailas and A. Shrivastava and K. Ramachandran and A. Chatterjee and V. Jha and P. Singh, Nuclear Physics A **792**, 187 (2007).
 - [30] T. Matsumoto and *et al.*, Phys. Rev C **70**, 061601(R) (2004).
 - [31] E. F. Aguilera and *et al.*, Phys. Rev. C **63**, 061603(R) (2001).
 - [32] E.A. Benjamim and *et al.*, Phys. Lett. B **647**, 30 (2007).
 - [33] A. Chatterjee and *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 032701 (2008).
 - [34] K. Rusek, I. Martel, J. Gómez-Camacho, A. M. Moro, and R. Raabe, Phys. Rev. C **72**, 037603 (2005).
 - [35] A.M. Sánchez-Benítez and *et al.*, Nuclear Physics A **803**, 30 (2008).
 - [36] L. C. Chamon, B. V. Carlson, L. R. Gasques, D. Pereira, C. De Conti, M. A. G. Alvarez, M. S. Hussein, M. A. Cândido Ribeiro, E. S. Rossi, and C. P. Silva, Phys. Rev. C **66**, 014610 (2002).
 - [37] L. C. Chamon, D. Pereira, M. S. Hussein, M. A. Cândido Ribeiro and D. Galetti, Phys. Rev. Lett., **79**, 5218 (1997).
 - [38] J. C. Zamora and *et al.*, Phys. Rev. C **64**, 034611 (2011).
 - [39] I. J. Thompson, M. A. Nagarajan, J. S. Lilley and M. J. Smithson. Nuclear Physics A **505**(1), **84** (1989).
 - [40] A. Barioni and *et al.*, Phys. Rev. C **84**, 014603 (2011).



VISUALIZAÇÃO DE DESPACHO

Processo	2010/18687-4
Linha de Fomento	Programas Regulares / Bolsas / No País / Pós-Doutorado - Fluxo Contínuo
Situação	Encerrado
Vigência	01/06/2011 a 30/11/2012
Beneficiário	Kelly Cristina Cezaretto Pires
Responsável	Rubens Lichtenthäler Filho
Vínculo Institucional do Processo	Instituto de Física/IF/USP
Área de Alocação de Recursos	Física

Folha de Despacho

Datas do Despacho

Emitido em / por: 17/04/2013 Paula Piva

Objetos de análise

Objeto de análise	Data de Submissão	Resultado
Relatório Científico 2	04/02/2013	Aprovado

Observações / Transcrições / Frases

Observações ao Beneficiário

Comunicamos que seu Relatório Científico foi analisado pela assessoria científica da FAPESP.

Para visualizar o parecer, a senhora deve acessar o Sistema SAGe (www.fapesp.br/sage), clicar item do menu Processos/Meus Processos, clicando em Mais Informações "Consultar Despachos".

Atenciosamente,

Prof. Carlos Henrique de Brito Cruz
Diretor Científico da FAPESP

Frases para o Beneficiário

Não há frases associadas.

Transcrição de Parecer para o Beneficiário

Parecer do Relatório Científico

Por favor, emita o parecer, comentários, críticas e sugestões.

Trata-se do Relatório Final de atividades da pesquisadora Kelly C.C. Pires. Neste período adicional do seu programa de pós-doutoramento, a pesquisadora concluiu parte das análises que vinha realizando, dentro do contexto da proposta submetida, e apresentou estes resultados em conferência internacional e também em uma reunião nacional, com a submissão de trabalhos para publicação em proceedings. Também submeteu artigo para publicação na revista científica Physical Review C. Além disto, durante o período de vigência deste último relatório, fica claro que a pesquisadora participou diretamente das atividades experimentais do grupo na USP, como descrito no relatório anterior. Solicitou cancelamento da bolsa por ter sido contratada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, mas diz que irá manter colaboração com o grupo da USP para concluir as análises em andamento. Considero satisfeitas as metas originalmente propostas pela pesquisadora.

Avaliação

Para Relatório DE PROGRESSO

Etapa cumprida no relatório apresentado

- ☒ Ótimo
☐ Bom
☐ Regular
☐ Fraco

Programa de trabalho para a próxima etapa

- ☐ Ótimo
☒ Bom
☐ Regular
☐ Fraco

A evolução do projeto permite prever sua conclusão dentro do prazo previsto?

- ☐ Sim
☒ Não

Se NÃO, comente no espaço abaixo

O programa de pós-doutoramento está sendo encerrado, pois a pesquisadora foi contratada na Universidade Tec. Fed. do Paraná. Mas deixa claro que irá continuar colaborando com o grupo da USP para terminar suas análises.

Para Relatório FINAL

Em relação à proposta inicial os resultados obtidos estão:

- ☐ Acima das expectativas
☒ Dentro das expectativas
☐ Aquém das expectativas
☐ Muito aquém das expectativas

Observações que julgar pertinentes

Frases para Termo de Outorga

Não há frases associadas.

Relatório Científico 2 (Aprovado)

Compromisso	10/02/2013
Período Relacionado	12/04/2012 a 31/05/2013
Situação	Atendido