

Universidade de São Paulo  
Instituto de Física

# Produção de feixes radioativos ricos em nêutrons na região de massa $A=10$ a $15$

George Abud Scotton

Orientador: Prof. Dr. Valdir Guimarães

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de  
Física para a obtenção do título de Mestre em  
Ciências

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Valdir Guimarães (IF-USP)

Prof. Dr. Maurício Moralles (IPEN-USP)

Prof. Dr. Andrés Arazi (Laboratório Tandem – Argentina)

São Paulo

2017

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
**Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação**  
**do Instituto de Física da Universidade de São Paulo**

Scotton, George Abud

Produção de feixe radioativos ricos em nêutrons na região de massa  
A=10 a 15. São Paulo, 2017.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Instituto de  
Física. Depto. de Física Nuclear.

Orientador: Prof. Dr. Valdir Guimarães  
Área de Concentração: Física Nuclear

Unitermos: 1. Física nuclear; 2. Núcleos exóticos; 3. Simulação; 4. Trajetória.

USP/IF/SBI-036/2017

Universidade de São Paulo  
Instituto de Física

# Production of neutron-rich radioactive beams in region of mass $A=10$ to $15$

George Abud Scotton

Advisor: Prof. Dr. Valdir Guimarães

Master's thesis submitted to the institute of Physics  
to obtain the title of Master of Science

Examination Board:

Prof. Dr. Valdir Guimarães (IF-USP)

Prof. Dr. Maurício Moralles (IPEN-USP)

Prof. Dr. Andrés Arazi (Laboratório Tandem – Argentina)

São Paulo

2017



## Agradecimentos

Primeiramente agradeço aos meus pais e à minha família por todo apoio à seguir essa jornada que resolvi traçar.

Agradeço também ao meu orientador Valdir Guimarães pela orientação, dedicação e aprendizado que me disponibilizou neste trabalho que sem ele não seria possível.

À Valdir Scarduelli pelas dicas e disponibilidade durante meu trajeto.

À Gabriela Barcellos Bugelli pela amizade, risadas, viagens, festas, bons momentos e vídeos de gatos que tivemos juntos desde a graduação.

À Fábio Chibana de Castro pela amizade, porções e boas conversas durante esses anos.

À Henrique Zanoli pela amizade e ajuda em todos os anos da graduação que vivemos juntos.

À Victor Santoro e ao time de basquete da física, por todas os jogos perdidos e treinos ganhos que tivemos juntos e por fazer minha passagem nesse caminho um lugar infinitamente melhor.

A todos os meus amigos que conheci na Física que me trouxeram ótimos anos de vida.

À CNPq pelo apoio financeiro deste trabalho.

## Resumo

Investigação da estrutura de núcleos exóticos é uma área bastante ativa da Física Nuclear atual. O desenvolvimento dessa área foi acentuado com a possibilidade de uso de feixes radioativos. Inspirados nessa possibilidade, laboratórios espalhados pelo mundo estão se desenvolvendo para produzir feixes radioativos de núcleos cada vez mais ricos em prótons ou em nêutrons. O uso de elementos radioativos como feixes têm oferecido oportunidades novas e únicas para pesquisa em física nuclear. Questões fundamentais tais como qual a natureza da matéria nuclear e como elementos pesados são sintetizados em novas, supernovas e estrelas de nêutrons podem ser abordadas em investigações utilizando-se feixes radioativos. Neste trabalho abordamos a produção de alguns desses feixes na região de massa  $A=10$  e  $15$ , especificamente,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{12}\text{B}$ ,  $^{14}\text{C}$  e  $^{15}\text{C}$ . Descrevemos métodos de produção e aplicamos simulações para produção de feixes com esses núcleos. Abordamos as peculiaridades na produção de cada um deles com o intuito de produzir feixes o mais intenso e puros possíveis. Nas simulações utilizamos a plataforma Lise++ baseada em método de Monte Carlo e foi dada ênfase na utilização de um sistema de duplo-solenoides. As simulações foram comparadas com resultados experimentais obtidos com esse sistema para os feixes de  $^{12}\text{B}$  e  $^{14}\text{C}$ , onde um bom acordo foi obtido.

Palavras chave: Feixes radioativos, núcleos exóticos, simulação.

## Abstract

Nuclear Structure Investigations of exotic nuclei is currently a very active area of Nuclear Physics. Many laboratories around the world are developing their system to produce radioactive beams of nuclei rich in protons or neutrons. The use of these radioactive elements as beams has offered new and unique opportunities for research in nuclear physics. Fundamental questions such as what the nature of nuclear matter is and how heavy elements are synthesized in novae, supernovae and neutron stars can be addressed in investigations using radioactive beams. In this work we address the production of some of these beams in the region of mass  $A = 10$  and  $15$ , specifically  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{12}\text{B}$  e  $^{14,15}\text{C}$ . We describe production methods and apply simulations using the plataforma Lise++ with Monte Carlo method. We addressed the peculiarities related to the production of each of them, in the sense to get the most intense and pure secondary radioactive beams possible. In the simulations, emphasis was given to the use of a double-solenoid system. The simulations were compared with experimental results obtained with these systems for the  $^{12}\text{B}$  and  $^{14}\text{C}$  beams, where a good agreement was obtained.

keywords: Radioactive beams, exotic nuclei, simulation.

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 - Tabela de nuclídeos para os elementos leves indicando quais são os que possuem configurações de halo e borromeanos. Figura extraída da ref. [5].....  | 13 |
| Figura 1.2 - Carta de Nuclídeos indicando a região de núcleos radioativos ainda não totalmente explorada, terra incógnita .....  | 15 |
| Figura-2.1 - Desenho esquemático do método a) ISOL e b) “In-flight” de produção de feixes radioativos.....   | 17 |
| Figura-2.2 - Foto artística do sistema RIBRAS instalado no Instituto de Física da USP...20   |    |
| Figura-2.3 - Desenho esquematizado do sistema RIBRAS.....  | 20 |
| Figura-2.4 - Desenho esquemático da focalização com um solenoide finito.....   | 22 |
| Figura 2.5 - Modos de focalização utilizando o segundo solenoide do sistema RIBRAS. Figura extraída de ref. [21] .....   | 23 |
| Figura 2.6 - Trajetória helicoidal de partículas carregadas em um solenoide.....   | 23 |
| Figura 2.7 - Gráfico esquemático das componentes longitudinal e radial do campo magnético dentro de um solenoide finito.....   | 24 |
| Figura 3.1 - Desenho esquemático das trajetórias das partículas após o primeiro solenoide do sistema RIBRAS.....   | 28 |
| Figura 3.2 - Janela de diálogo para montar a configuração do separador desejado.....   | 3  |
| Figura 4.1 - Figura com os cálculos de trajetórias para o $^{12}\text{B}$ de 29.9 MeV através de apenas um solenoide e para os ângulos 2, 3, 4, 5 e 6 graus. A focalização se dá a 2.65 m do alvo de produção..... | 37 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 4.2 - Espectro $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$ estimado com os contaminantes que são aceitos pelo solenoide com a mesma rigidez magnética. As intensidades de cda contaminante são artificiais.....   | 38 |
| Figura 4.3 - Desenho esquemático do setup utilizado nas medidas de produção do feixe secundário de $^{12}\text{B}$ . Figura extraída da ref. [20].....   | 40 |
| Figura 4.4 - Típico espectro $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$ obtido durante as medidas da produção do feixe radioativo de $^{12}\text{B}$ . As partículas do feixe de $^{12}\text{B}$ e os contaminantes foram espalhados por um alvo de Au e medidas a 20 graus. ....   | 41 |
| Figura 4.5 - a) e b) Cálculo de trajetória e c) projeção em energia do feixe radioativo de $^{12}\text{B}$ e feixe espalhado de $^{11}\text{B}$ para $I_{\text{sol}} = 27.008 \text{ A}$ . Podemos notar que o foco para as partículas de $^{12}\text{B}$ é bom mas temos a presença considerável de partículas de $^{11}\text{B}$ que ainda passam pelo bloqueador colocado a 2.2 m. .... | 42 |
| Figura 4.6 - a) e b) Cálculo de trajetória e c) projeção em energia do feixe radioativo de $^{12}\text{B}$ e feixe espalhado de $^{11}\text{B}$ para $I_{\text{sol}} = 27.12 \text{ A}$ .....  | 43 |
| Figura 4.7 - a) e b) Cálculo de trajetória e c) projeção em energia do feixe radioativo de $^{12}\text{B}$ e feixe espalhado de $^{11}\text{B}$ para $I_{\text{sol}} = 27.252 \text{ A}$ . ....  | 44 |
| Figura 4.8 - a) e b) Cálculo de trajetória do feixe radioativo de $^{12}\text{B}$ e feixe espalhado de $^{11}\text{B}$ para $I_{\text{sol}} = 27.376 \text{ A}$ . c) projeção em energia de $^{12}\text{B}$ e $^{11}\text{B}$ . ....   | 45 |
| Figura 4.9 - a) e b) Cálculo de trajetória do feixe radioativo de $^{12}\text{B}$ e feixe espalhado de $^{11}\text{B}$ para $I_{\text{sol}} = 27.451 \text{ A}$ . c) projeção em energia de $^{12}\text{B}$ . ....   | 46 |
| Figura 4.10 - a) e b) Cálculo de trajetória do feixe radioativo de $^{12}\text{B}$ e feixe espalhado de $^{11}\text{B}$ para $I_{\text{sol}} = 27.633 \text{ A}$ . c) projeção em energia de $^{12}\text{B}$ . ....  | 47 |
| Figura 4.11 - a) e b) Cálculo de trajetória do feixe radioativo de $^{12}\text{B}$ e feixe espalhado de $^{11}\text{B}$ para $I_{\text{sol}} = 27.739 \text{ A}$ . c) projeção em energia de $^{12}\text{B}$ . ....  | 48 |
| Figura 4.12 - a) e b) Cálculo de trajetória do feixe radioativo de $^{12}\text{B}$ e feixe espalhado de $^{11}\text{B}$ para $I_{\text{sol}} = 27.802 \text{ A}$ . c) projeção em energia de $^{12}\text{B}$ . ....  | 49 |
| Figura 4.13 - Janela da plataforma Lise++ indicando os blocos utilizados na simulação do sistema RIBRAS.....   | 50 |

- Figura 4.14 - Desenho esquemático do sistema RIBRAS simulado na plataforma Lise++. O bloco azul representa o alvo, dourado o solenoide, branco o colimador e rosa os detectores.....51
- Figura 4.15 - Resultado da simulação com LISE++ da passagem (envelope) do feixe radioativo  $^{12}\text{B}$  de 29.2 MeV e para corrente do solenoide  $I=27.3$  A. A focalização se dá no ponto 2.65 m do alvo de produção. Nessa figura ainda não aplicados os GATES que simulam os bloqueadores. .... 52
- Figura 4.16 - Resultado da simulação com Lise++ da passagem (envelope) do feixe radioativo  $^{12}\text{B}$  de 29.2 MeV e corrente do solenoide  $I=27.3$  A. O GATE-1 (-18.5,+18.5) em 0.350 m foi adicionado. Esse gate simula o copo de Faraday bloqueando partículas emitidas entre 0 e 3 graus. .... 53
- Figura 4.17 - Resultado da simulação com Lise++ da passagem (envelope) do feixe radioativo  $^{12}\text{B}$  de 29.2 MeV pelo sistema com uma corrente do solenoide  $I=27.3$  A. Foi adicionado o GATE-1 ( $\pm 18.5$ ) em 0.350 m e o GATE-2 ( $\pm 17.5$ ) em 2.2 m. Esses gates simulam o copo de Faraday bloqueando partículas emitidas entre 0 e 3 graus e o Lollipop que bloqueia as partículas com rigidez magnética menor que o feixe focalizado. ....54
- Figura 4.18 - Simulação da passagem do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  pelo sistema para  $I_{\text{SOL}}=27.0\text{A}$ .....55
- Figura 4.19 - Simulação da passagem (envelope) do feixe primário espalhado de  $^{11}\text{B}$  pelo sistema para  $I_{\text{SOL-1}}=27.0\text{A}$ .....55
- Figura 4.20 - Simulação do gráfico  $\Delta E-E$  para partículas de  $^{12}\text{B}$  e  $^{11}\text{B}$  para  $I_{\text{SOL}}=27.0\text{A}$ .....55
- Figura 4.21 - Simulação da posição X versus Y para partículas de  $^{12}\text{B}$  para  $I_{\text{SOL}}=27.0\text{A}$ .....56
- Figura 4.22 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de a)  $^{12}\text{B}$  e b)  $^{11}\text{B}$  pelo sistema para  $I_{\text{SOL}}=27.3\text{A}$ . ....57
- Figura 4.23 - Simulação do gráfico  $\Delta E-E$  ( $19\mu\text{m}$  e  $500\mu\text{m}$ ) para partículas de  $^{12}\text{B}$  e  $^{11}\text{B}$  para  $I_{\text{SOL-1}}=27.3\text{A}$ .....57
- Figura 4.24 - Simulação do gráfico Y versus X para partículas de  $^{12}\text{B}$  para  $I_{\text{SOL-1}}=27.3$  A. Esse gráfico mostra o foco no ponto de cruzamento em 2.650 m. Podemos observar

que as partículas estão abaixo do limite  $\pm 5$  mm definido pela abertura do colimador no ponto de cruzamento.

Figura 4.25 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  a) e  $^{11}\text{B}$  b) pelo sistema para  $I_{\text{SOL-1}}=27.6\text{A}$ .

Figura 4.26 - Simulação do Lise++ para a taxa de produção (pps) em função da corrente do solenoide considerando uma abertura do colimador no ponto de cruzamento de 5 e 10mm.

Figura 4.27 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{12}\text{B}$  com colimador do ponto de cruzamento com  $\pm 5$  mm de raio.

Figura 4.28 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{12}\text{B}$  com colimador do ponto de cruzamento com  $\pm 10$  mm de raio.

Figura 4.29 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{12}\text{B}$  com colimador do ponto de cruzamento com 5 mm de raio e Lollipop com raio de 25 mm.

Figura 4.30 - Cálculo de trajetória do feixe radioativo de  $^{14}\text{C}$  para  $I_{\text{sol}} = 26.0$  A.

Figura 4.31 - Espectro  $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$  calculado para a produção do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$ . As intensidades são artificiais.

Figura 4.32 - Típico espectro  $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$  obtido durante as medidas da produção do feixe radioativo de  $^{14}\text{C}$ . As partículas do feixe de  $^{14}\text{C}$  e os contaminantes foram espalhados por um alvo de Au e detectados a 20 graus.

Figura 4.33 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de  $^{14}\text{C}$  pelo sistema RIBRAS para  $I_{\text{SOL-1}}=26.0\text{A}$ .

Figura 4.34 - Distribuição da energia cinética das partículas de  $^{14}\text{C}$  produzidas que atravessam o colimador do ponto de cruzamento com  $\pm 5$  mm de abertura. O valor médio é  $33.3 \pm 0.3$  MeV.

Figura 4.35 – Distribuições angulares calculadas pelo método DWBA para as reações e energias indicadas.

Figura 4.36 - Simulação do LISE++ para a taxa de produção (pps) em função da corrente do solenoide para o feixe de  $^{10}\text{Be}$  de 24.4 MeV, após alvo, com a reação  $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{Be})$  e com feixe primário de  $^{11}\text{B}$  de 35 MeV antes do alvo e  $1\mu\text{A}$  de intensidade.

Figura 4.37 - Simulação do LISE++ para a taxa de produção (pps) em função da corrente do solenoide para o feixe de  $^{10}\text{Be}$  de 24.1 MeV, após alvo, com a reação  $^9\text{Be}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})$  e com feixe primário de  $^9\text{B}$  de 24 MeV antes do alvo e 1  $\mu\text{A}$  de intensidade.

Figura 4.38 - Simulação do LISE++ para a taxa de produção (pps) em função da corrente do solenoide para o feixe de  $^{10}\text{Be}$  de 24.0 MeV, após alvo, com a reação  $^9\text{Be}(^{10}\text{B}, ^{10}\text{Be})$  e com feixe primário de  $^{10}\text{B}$  de 31 MeV antes do alvo e 1  $\mu\text{A}$  de intensidade.

Figura 4.39 – Distribuição de energia obtido pela simulação para o feixe secundário de  $^{10}\text{Be}$  com a reação  $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{Be})$  e uma corrente  $I_{\text{SOL-1}}=28.5\text{A}$ . O feixe primário de  $^{11}\text{B}$  de 35 MeV antes do alvo. O centroide da distribuição energia para o  $^{10}\text{Be}$  está em  $24.4\pm 0.4$  MeV.

Figura 4.40 – Distribuição de energia obtido pela simulação para o feixe secundário de  $^{10}\text{Be}$  com a reação  $^9\text{Be}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})$  e uma corrente  $I_{\text{SOL-1}}=28.2\text{A}$ . O feixe primário de  $^9\text{Be}$  de 24 MeV antes do alvo. O centroide da distribuição energia para o  $^{10}\text{Be}$  está em  $24.1\pm 0.2$  MeV

Figura 4.41 – Distribuição de energia obtido pela simulação para o feixe secundário de  $^{10}\text{Be}$  com a reação  $^9\text{Be}(^{10}\text{B}, ^{10}\text{Be})$  e uma corrente  $I_{\text{SOL-1}}=28.3\text{A}$ . O feixe primário de  $^{10}\text{B}$  de 31 MeV antes do alvo. O centroide da distribuição energia para o  $^{10}\text{Be}$  está em  $24.0\pm 0.4$  MeV.

Figura 4.42 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de **a)**  $^{10}\text{Be}$ , **b)**  $^{11}\text{B}$  e **c)**  $^{10}\text{B}$  pelo sistema para corrente  $I_{\text{SOL-1}}=28.5$  A.

Figura 4.43 - Desenho esquemático do sistema RIBRAS simulado na plataforma LISE++. O bloco azul representa o alvo de produção, blocos dourados os solenoides, brancos os colimadores, os blocos de cor rosa são materiais, sendo o primeiro um degradador de  $^{27}\text{Al}$  e os outros dois detectores de Silício.

Figura 4.44 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de  $^{10}\text{Be}$  pelo sistema com dois solenoides,  $I_{\text{SOL-1}}=28.5\text{A}$  e  $I_{\text{SOL-2}}=24.8\text{A}$  (sem degradador).

Figura 4.45 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{10}\text{Be}$  com os dois solenoides e sem degradador de alumínio. A distribuição está centrada em  $24.44\pm 0.29$  MeV.

Figura 4.46 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{10}\text{Be}$  com os dois solenoides e com um degradador de alumínio de 5  $\mu\text{m}$  de espessura. A distribuição está centrada em  $22.43\pm 0.31$  MeV.

Figura 4.47 - Simulação do LISE++ para a taxa de produção (pps) em função da corrente do solenoide para o feixe de  $^{15}\text{C}$  de 35.0 MeV, após alvo, com a reação  $^9\text{Be}(^{18}\text{O},^{15}\text{C})$  e com feixe primário de  $^{18}\text{O}$  de 47 MeV antes do alvo e  $1\mu\text{A}$  de intensidade.

Figura 4.48 - Simulação do LISE++ para a taxa de produção (pps) em função da corrente do solenoide para o feixe de  $^{15}\text{C}$  de 35.0 MeV, após alvo, com a reação  $^9\text{Be}(^{18}\text{O},^{15}\text{C})$  e com feixe primário de  $^{18}\text{O}$  de 47 MeV antes do alvo e  $1\mu\text{A}$  de intensidade.

Figura 4.49 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de  $^{15}\text{C}$  pelo sistema para  $I_{\text{SOL-1}}=28.2$  A. A reação utilizada foi  $^9\text{Be}(^{18}\text{O},^{15}\text{C})$  com um feixe de  $^{18}\text{O}$  de 48 MeV.

Figura 4.50 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{15}\text{C}$  com colimador do ponto de cruzamento com 10 mm de raio e Lollipop com raio de 17.5 mm. A reação utilizada foi  $^9\text{Be}(^{18}\text{O},^{15}\text{C})$  com um feixe de  $^{18}\text{O}$  de 47 MeV. A energia média obtida foi  $35.0\pm 1.0$  MeV.

Figura 4.51 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de  $^{15}\text{C}$  pelo sistema para  $I_{\text{SOL-1}}=28.0$  A. A reação utilizada foi  $^{13}\text{C}(^{18}\text{O},^{15}\text{C})$  com um feixe de  $^{18}\text{O}$  de 42 MeV.

Figura 4.52 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{15}\text{C}$  com colimador do ponto de cruzamento com 10 mm de raio e Lollipop com raio 17.5 mm. A reação utilizada foi  $^{13}\text{C}(^{18}\text{O},^{15}\text{C})$  com um feixe de  $^{18}\text{O}$  de 42 MeV. A energia média obtida foi  $35.6\pm 0.5$  MeV.

Figura 4.53 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{15}\text{C}$  com colimador do ponto de cruzamento com 10 mm de raio e Lollipop com raio de 30 mm. A reação utilizada foi  $^{13}\text{C}(^{18}\text{O},^{15}\text{C})$  com um feixe de  $^{18}\text{O}$  de 42 MeV. A energia média obtida foi  $35.9\pm 0.4$  MeV.

## **Lista de Tabelas**

Tabela-1. Nucleos radioativos produzidos pelos Sistemas RIBRAS e Twinsol. As intensidades dos feixes secundários se referem a feixes primários de 1 microA de intensidade

Tabela-2: Parâmetros dos elementos para simulação Lise++ com o sistema RIBRAS.

Tabela-3: Parâmetros dos elementos para simulação Lise++ com o sistema RIBRAS com dois solenoides.

## Sumário

1 - Introdução

2 - Produção dos feixes radioativos

2.1 Formas de produção de feixes radioativos.

2.2 Sistema RIBRAS.

3 - Simulações

3.1 Cálculos de trajetórias

3.2 Simulação Monte Carlo com plataforma LISE++

4. Produção de feixes radioativos

4.1 Produção do feixe radioativo secundário de  $^{12}\text{B}$ .

4.2 Produção do feixe radioativo secundário de  $^{14}\text{C}$ :

4.3 Produção do feixe radioativo secundário de  $^{10}\text{Be}$ .

4.4 Produção do feixe radioativo secundário de  $^{15}\text{C}$ .

5. Conclusão.

# 1 Introdução

Núcleos são sistemas quânticos de muitos corpos caracterizados não apenas pelo número de nêutrons e prótons ( $N, Z$ ), mas também pelo número de isospin,  $T_z = (N - Z)/2$ , momento angular total ( $J$ ), energia de excitação ( $E$ ) e densidade ( $\rho$ ). A pesquisa em física nuclear nos dias de hoje tem exigido que valores extremos para esses números sejam agora explorados. Alguns núcleos leves, com alta assimetria no número de nêutrons e prótons, ou seja, alto número de isospin, exibem propriedades exóticas e são chamados núcleos exóticos [1]. O exemplo mais conhecido de um núcleo exótico é o  $^{11}\text{Li}$  devido ao seu pronunciado efeito halo [2,3] onde os dois nêutrons de valência formam um tipo de nuvem com uma longa distribuição espacial. Essa extensão radial faz com que o tamanho final do  $^{11}\text{Li}$  seja comparável ao do  $^{238}\text{U}$  tendo, portanto, sérias consequências nos diversos mecanismos de reações. Além do  $^{11}\text{Li}$ , alguns núcleos exóticos, como o  $^6\text{He}$ , formam um sistema ligado do tipo anéis borromeano (3 anéis ligados que se separam quando um deles é quebrado). Esses anéis são associados às ligações de 3-corpos,  $^4\text{He} + n + n$  para o caso do  $^6\text{He}$  e  $^9\text{Li} + n + n$  para o  $^{11}\text{Li}$ . Alguns outros núcleos radioativos leves como  $^8\text{B}$ ,  $^{11,12}\text{Be}$ ,  $^{17}\text{Ne}$  que também tem um excesso de nêutrons ou de prótons em suas configurações, são também conhecidos como exóticos por terem formas exóticas de decaimento e arranjo dos nucleons que os compõem [1]. Uma outra característica importante dos núcleos exóticos é o fato de serem em geral fracamente ligados. Nesse caso, quando esse núcleo é um projétil que se aproxima do campo eletromagnético de um núcleo alvo, ele se quebra facilmente favorecendo o



acoplamento para estados do contínuo. Núcleos exóticos são importantes em várias outras áreas da Física Nuclear. Em termos de estrutura nuclear, o modelo de camadas falha totalmente na explicação da estrutura de núcleos exóticos e precisa ser revisto. Temos ainda a pesquisa do modelo padrão e interações eletrofracas que podem ser investigadas através de medidas precisas de decaimento nuclear ( $\beta$ ) de núcleos exóticos [4]. Física nuclear aplicada em medicina envolve núcleos radioativos emissores de prótons que são importantes para diagnóstico e terapia de câncer. Pesquisas recentes têm mostrado, por exemplo, que feixes de isótopos radioativos de carbono ricos em prótons ( $^9\text{C}$ ,  $^{10}\text{C}$  e  $^{11}\text{C}$ ) podem ser úteis para medicina [5].

Núcleos radioativos leves têm um interesse também para a astrofísica nuclear e nucleossíntese de elementos leves. A sequência de reações presentes em processos de captura rápida de nêutrons e prótons, que ocorrem em eventos explosivos de novas e supernovas, envolvem exatamente núcleos radioativos longe da linha de estabilidade. O fato de ainda não termos um total conhecimento das propriedades desses núcleos em termos de massas, probabilidades de decaimento, seções de choque de captura, fazem com que ainda não tenhamos o completo entendimento da evolução de vários entes astrofísicos. Núcleos radioativos leves têm uma participação importante tanto no início dos fenômenos explosivos de Nova e Supernova, onde elementos mais pesados que o Ferro são sintetizados, nos processos iniciais da evolução de estrelas supermassivas e também no universo primordial (não-homogêneo). Esses ambientes de altas densidades e temperaturas são propícios para formação de núcleos que estão longe da linha de estabilidade na tabela de nuclídeos. É interessante notar que enquanto há na natureza algo em torno de 280 elementos estáveis (contando os isótopos estáveis), devem existir mais de 3000 núcleos radioativos (a sua grande maioria ainda não estudados e conhecidos como Terra incógnita na tabela de nuclídeos, veja Figura 1.2.

Reações diretas de espalhamento, breakup e transferência, envolvendo núcleos radioativos como projétil, por serem bastante seletivas, são reações propícias e as principais ferramentas para se estudar a estrutura de núcleos exóticos e explorar as mudanças de orbitais e modelo de camada que ocorrem nesses núcleos. Medidas de reações diretas com feixes de núcleos radioativos e/ou exóticos podem fornecer importantes informações sobre a estrutura nuclear bem como poderá trazer importantes contribuições para elucidar alguns problemas de estrutura nuclear e reações de interesse astrofísico.

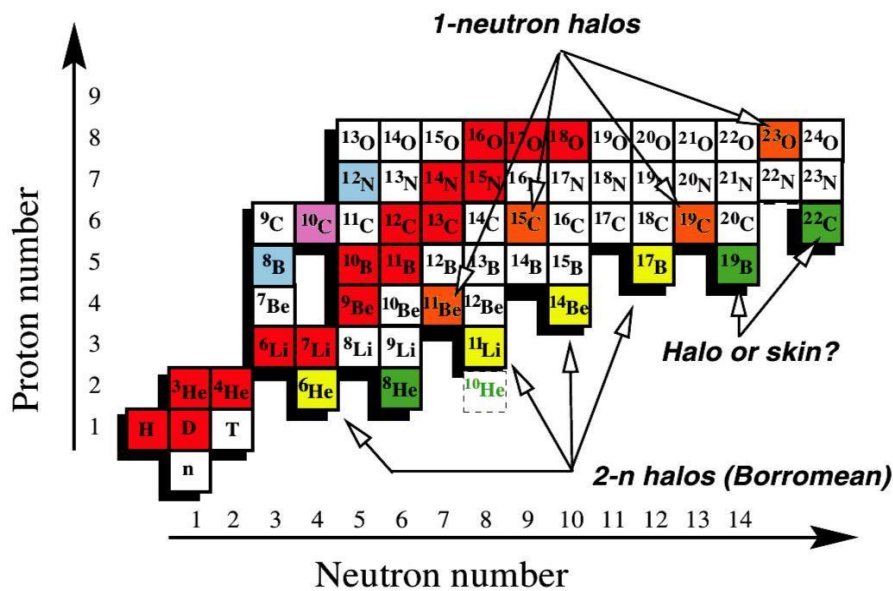


Figura-1.1 - Tabela de nuclídeos para os elementos leves indicando quais são os que possuem configurações de halo e borromeanos. Figura extraída da ref. [3].

Para que possamos realizar as investigações de estrutura de núcleos exóticos muito ricos em prótons ou em nêutrons precisamos utilizar reações induzidas por feixes de núcleos também ricos em prótons ou em nêutrons, ou seja, feixes com elementos radioativos. Feixes radioativos, em inglês Radioactive Nuclear Beams (RNB), são feixes com elementos de vidas médias curtas, em torno de micro a mili segundos. A Europa através da ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures) está financiando em larga escala os grandes laboratórios de Física Nuclear, tais como

GANIL/SPIRAL2 (Grand Accelérateur National d'Ions Lourds) na França [6], FAIR/GSI (Facility for Antiprotons and Ions Research) na Alemanha [7] e ISOLDE/CERN na Suíça [8] para que invistam na produção de feixes radioativos. Os Estados Unidos e Japão também estão investindo em laboratórios tais como NSCL-MSU (National Superconducting Cyclotron Laboratory - Michigan State University) nos Estados Unidos [9] e RIKEN no Japão [10], respectivamente. Esses laboratórios estão desenvolvendo técnicas e equipamentos para produção de feixes radioativos cada vez mais energéticos e mais ricos em nêutrons ou em prótons. Temos ainda laboratórios com feixes primários de energias mais baixas como **Twinsol** instalado na University of Notre Dame [11] e ISAC no laboratório TRIUMF– Canada [12], que também produzem feixes radioativos mas com energias mais baixas. Aqui no Brasil, foi instalado no IFUSP um sistema para produção de feixes radioativos, chamado **RIBRAS (Radioactive Ion Beam in Brasil)** [13]. O principal objetivo desse sistema é produzir feixes radioativos de baixas energias (2 a 5 MeV/A) para investigar a estrutura de núcleos leves ricos em nêutrons ou prótons e medidas de taxa de reações envolvendo esses núcleos. Esse sistema já está em operação no Laboratório Pelletron do Instituto de Física da USP desde o ano de 2004. Um artigo de revisão foi recentemente publicado, onde foram apresentadas as experiências realizadas entre 2004 e 2014 e os resultados com esse sistema [14].

O uso de elementos radioativos como feixes têm oferecido oportunidades novas e únicas para pesquisa em física nuclear. Um artigo de revisão recente com os trabalhos realizados com feixes radioativos leves nos últimos 10 anos (entre 2005 e 2015) pode ser visto na ref. [15]. Com o uso de feixes radioativos é possível se investigar núcleos em condições extremas não apenas em termos de densidade, temperatura e momento angular, mas também em termos de assimetria do número de prótons em relação ao de nêutrons. Ou seja, ao adicionarmos um número excessivo de prótons ou de nêutrons a um núcleo poderemos enfatizar e investigar certas propriedades nucleares tais como formas exóticas de decaimento (decaimento de diprótons) e arranjo de estrutura de

níveis, aumentando nossa compreensão da estrutura nuclear. É claro que estrutura nuclear e mecanismo de reações são campos de investigação intimamente interligados, e um estudo separado já não faz mais muito sentido. As propriedades isoladas dos núcleos interagentes determinam a dinâmica da reação e a dinâmica da reação sonda as propriedades fundamentais dos núcleos interagentes.

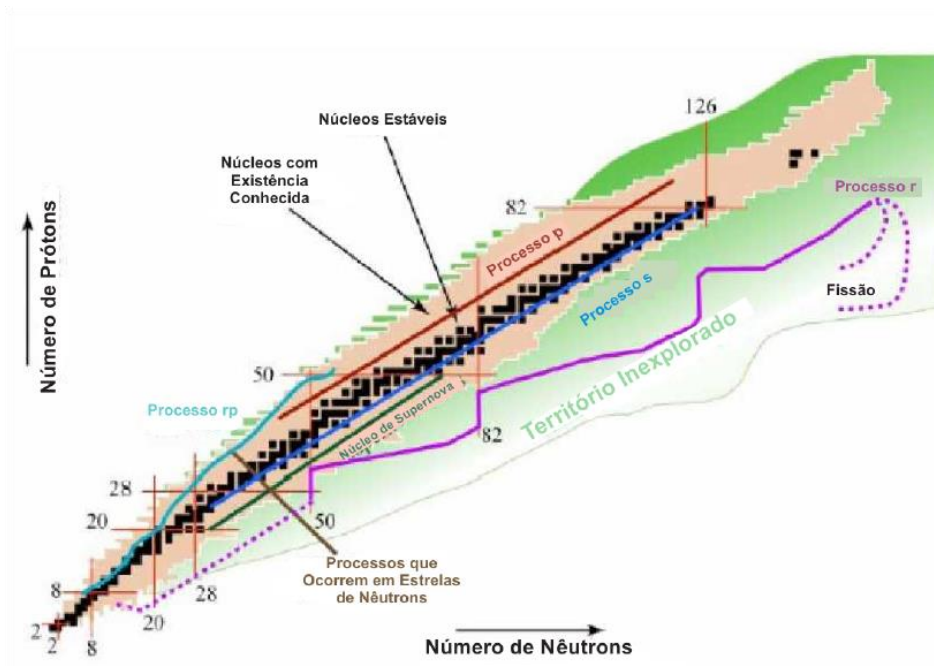


Figura 1.2 - Carta de Nuclídeos indicando a região de núcleos radioativos ainda não totalmente explorada, terra incógnita.

Neste trabalho vamos abordar a produção de alguns feixes radioativos leves, descrevendo métodos de produção e simulações.

Esquematizamos essa dissertação da seguinte forma: No Capítulo-2 falamos um pouco sobre os métodos de produção em geral e em particular sobre a produção de feixes radioativos utilizando-se o sistema de duplo solenoides. No Capítulo-3 descrevemos como foram feitos os cálculos de trajetória e também damos detalhes sobre a plataforma de simulação de produção de feixes radioativos, chamado LISE++. No Capítulo-4 damos ênfase a produção de cada um dos feixes abordados neste trabalho,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{12}\text{B}$ ,  $^{14}\text{C}$  e  $^{15}\text{C}$ . Por último a conclusão é apresentada no Capítulo-6.

# 2

## Produção de feixes radioativos

### 2.1 Formas de produção de feixes radioativos

Vamos neste capítulo abordar as formas de produção de feixes radioativos. Podemos produzir feixes radioativos utilizando-se basicamente dois métodos: ISOL (Isotopic Separation On-Line) e “In-flight” (em vôo), que vamos descrever com um pouco mais de detalhes abaixo:

O método ISOL tem sido utilizado desde 1965 com o espectrômetro de massa ISOLDE no CERN [8]. Nesse método os feixes radioativos são produzidos em duas etapas. Numa primeira etapa um feixe primário, a energias intermediárias ou relativísticas, incide sobre um alvo com espessura suficiente para parar o feixe. Elementos radioativos são então produzidos por reações de espalação ou fragmentação. O alvo de produção deve estar acoplado a uma fonte de íons de modo que os núcleos radioativos produzidos, se difundem com energia térmica até a fonte de íons onde são ionizados. Um desenho esquemático desse método é apresentado na Figura-2.1. Numa segunda etapa os elementos radioativos de interesse são extraídos dessa fonte e re-acelerados por um outro acelerador. O processo ISOL permite a obtenção de feixes radioativos com boa resolução em energia. A possibilidade de re-aceleração permite que possamos obter esses feixes com energia variável. A limitação do método, no entanto, é que devido ao processo lento de difusão dos núcleos radioativos produzidos na fonte de íons, fazendo com que os tipos de feixes que possam ser produzidos são restritos a núcleos com vidas médias entre 0.1 e 1 ms, ou seja,

elementos não muito ricos em nêutrons ou em prótons. Esse é o método utilizado por exemplo pelos grandes laboratórios como SPIRAL-GANIL (França) [6], REX-ISOLDE (Suiça) [8], RIKEN (Japão) [10] e TRIUMF (Canadá) [12].

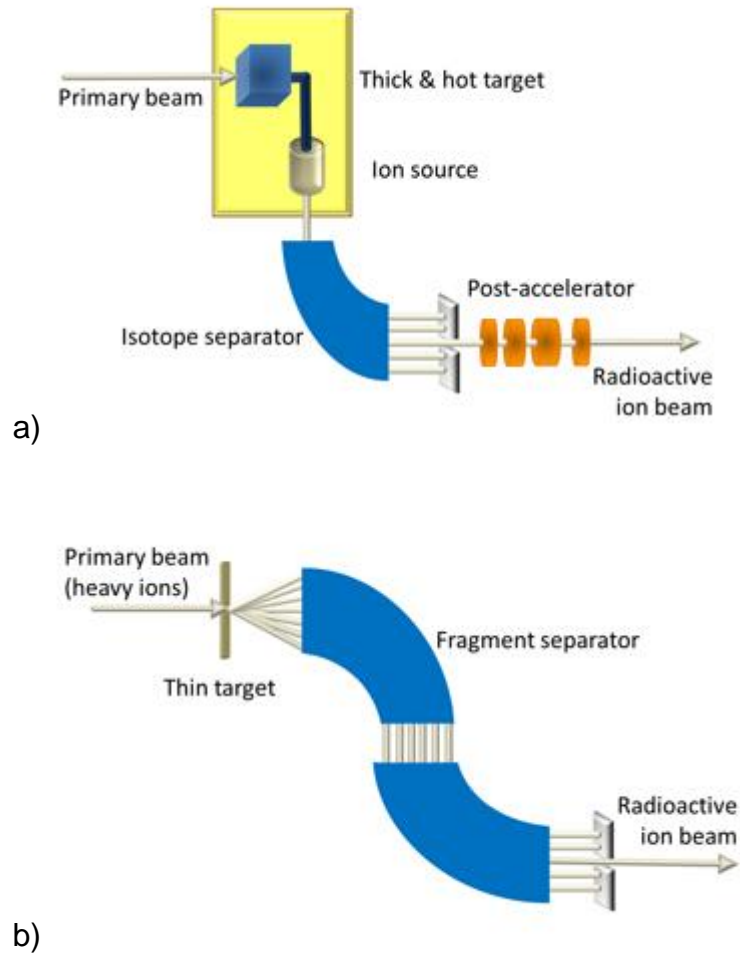


Figura 2.1 - Desenho esquemático do método a) ISOL e b) "In-flight" de produção de feixes radioativos.

No método em voo ("In-flight") podemos obter feixes radioativos com vidas médias mais curtas e, portanto, com núcleos bastante ricos em nêutrons ou prótons. Nesse método incide-se um feixe primário estável (de preferência isótopos estáveis já ricos em nêutrons, como por exemplo  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{36}\text{S}$ ,  $^{18}\text{O}$  ou ricos em prótons como  $^{50}\text{Cr}$  ou  $^{78}\text{Kr}$ , dependendo do que se deseja produzir) sobre um alvo. Nesse método utilizamos um alvo fino para que a perda de energia do feixe seja pequena e a velocidade dos produtos seja similar à velocidade do feixe primário. Elementos são produzidos por

diversas reações. Seleccionamos um desses elementos para se constituir do feixe secundário. O feixe secundário possui uma forte focalização cinemática a zero graus e sua seleção pode ser feita em voo com dipolos magnéticos e filtros de velocidade. A vantagem principal deste método é que podemos produzir feixes secundários de vida média muito curta (mili ou mesmo micro segundos), além do fato de não precisarmos de uma re-aceleração, uma vez que o feixe secundário já é produzido com uma energia próxima do feixe primário. Por outro lado, a resolução em energia normalmente não é excelente, devido a dispersão (“straggling”) em energia e em ângulo no alvo de produção, e a aceitação angular dos dipolos que em geral é muito reduzida. Intensidades típicas de feixes secundários de energia intermediária, produzidos por fragmentação de projétil, estão entre  $10^2$  e  $10^6$  partículas por segundo. Esse método é o mais adequado para ser utilizado também com aceleradores de energia mais baixas como Pelletron de São Paulo e o acelerador da Universidade de Notre Dame. Para feixes primários de baixas energias as reações de produção com maiores seções de choque são transferência de poucos nucleons, troca de carga, breakup e fusão.

Em resumo, a produção de feixes radioativos pelo método em voo depende basicamente da combinação de dois fatores: a escolha da reação que irá produzir o elemento desejado como feixe e o sistema óptico utilizado para selecionar e focalizar esse feixe secundário. A escolha do mecanismo mais adequado para a produção do feixe secundário depende de diversos fatores tais como quão exótico (quão rico em nêutrons ou em prótons) o queremos, a energia do feixe primário disponível e o tipo de processo de separação do feixe secundário que será utilizado. A separação do feixe secundário dos contaminantes pode ser feita diretamente em voo por campos eletromagnéticos (dipolos magnéticos, filtros de velocidade, ou solenoides). Feixes radioativos com energia  $E/A > 20$  MeV/A são produzidos com boa eficiência utilizando-se reações não seletivas de fragmentação. Para essas energias esse mecanismo é o de maior seção de choque. Os fragmentos são emitidos mais ou menos na mesma velocidade que o projétil, a separação é simples e podemos coletar boa parte dos

núcleos produzidos. Para feixes de energias mais baixas precisamos usar reações mais seletivas tais como breakup e reações de transferência de poucos nucleons, para que possamos transferir o máximo de energia possível do projétil para o fragmento de interesse. Reações inversa onde um elemento mais pesado incide sobre um mais leve é então mais recomendável. Além disso o feixe primário deve ser intenso ( $>0.5 \mu\text{A}$ ) e o alvo de produção deve ser robusto para suportar tal intensidade. A princípio qualquer separador óptico (combinação de elementos óticos como solenoides, dipolos e quadrupolos) pode ser utilizado com o método em voo para separar e focalizar os feixes de interesse. É claro que diferentes elementos óticos têm diferentes limites de aceitação angular. A escolha desses elementos vai determinar a intensidade e qualidade do feixe secundário em termos de resolução em energia e dispersão angular.

## 2.2 Sistema RIBRAS

Em São Paulo foi instalado no IFUSP um sistema para produção “*in-flight*” de feixes radioativos chamado **RIBRAS** (Radioactive Ion Beam in **B**rasil) [13,14]. Esse sistema é similar ao Twinsol da University of Notre Dame (EUA) [11], instalado alguns anos antes. O sistema RIBRAS, assim como o Twinsol, são baseados na combinação de dois solenoides supercondutores, com campos magnéticos centrais máximos em torno de 6.0 a 6.5 Tesla, capazes de selecionar e focalizar sobre um alvo secundário, feixes de núcleos radioativos produzidos por reações induzidas por um feixe primário de um elemento estável acelerado em um alvo de produção. Uma foto artística do sistema RIBRAS pode ser vista na Figura-2.2, enquanto que uma foto esquematizada com os diversos elementos pode ser vista na Figura-2.3. Os solenoides supercondutores são capazes de produzir um campo magnético de até 6.5 Tesla, utilizando bobinas de 60 cm de comprimento e em torno de 20.0 cm de raio. Essas bobinas são feitas de uma liga de Nióbio e Titânio, tornando-se supercondutora a temperaturas abaixo de 9K,



sendo refrigeradas por um sistema de multicamadas. A bobina fica imersa em Hélio líquido num reservatório de 300 litros a aproximadamente 4K. Esse reservatório é então blindado por uma câmara em vácuo, responsável por diminuir a condução de calor por radiação. Finalmente temos uma camada mais externa que consiste de um reservatório de nitrogênio líquido a 77K, envolvida por uma manta isolante.

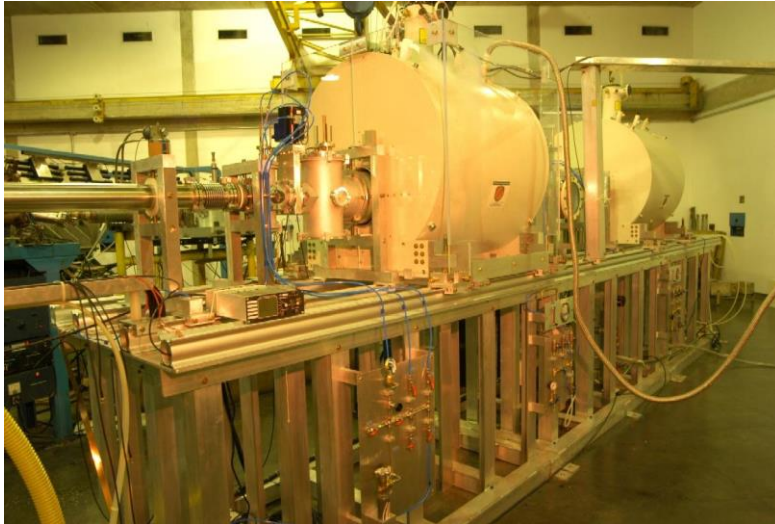


Figura 2.2 - Foto artística do sistema RIBRAS instalado no Instituto de Física da USP.

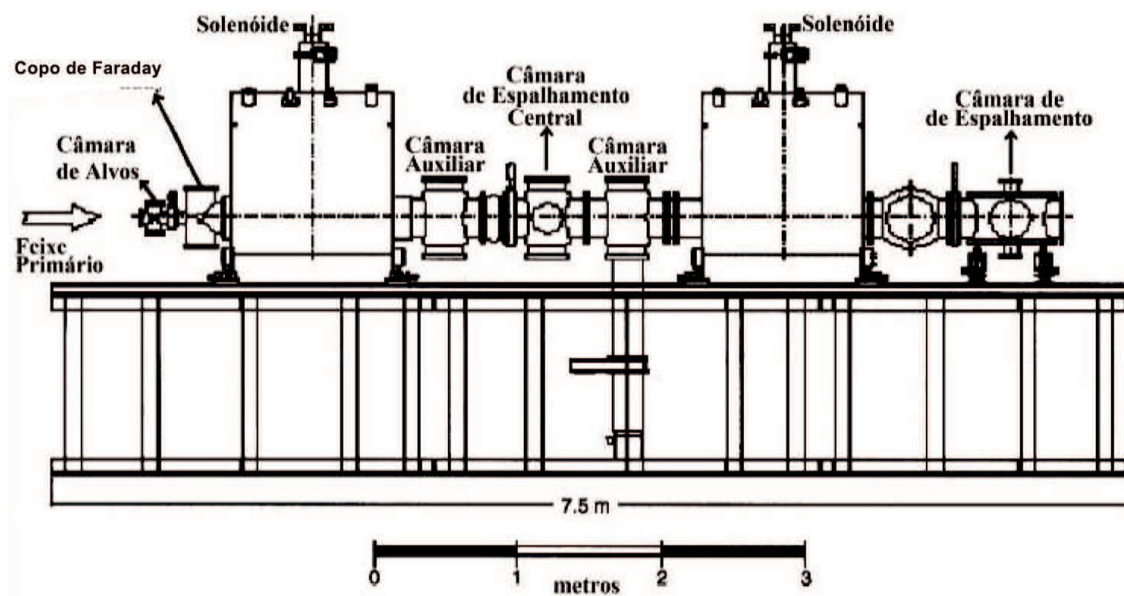


Figura 2.3 - Desenho esquematizado do sistema RIBRAS.

Utilizamos o acelerador Pelletron do Instituto de Física da USP para acelerar feixes primários de isótopos estáveis como  ${}^6,7\text{Li}$ ,  ${}^{10,11}\text{B}$  e  ${}^{12}\text{C}$  em energias em torno de 3-5 MeV/nucleon. Ao incidirmos feixes com esses elementos em um alvo de produção, que pode ser uma folha de Berílio ou uma célula de gás de  ${}^3\text{He}$ , podemos produzir elementos radioativos tais como  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^{10}\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{C}$ ,  ${}^{12}\text{B}$ ,  ${}^{12}\text{N}$  etc, através de reações de transferência de um ou dois nucleons. Considerando que produção é feita em voo, escolhemos reações que tenham um Q-de-reação positivo ou não muito negativo (no máximo 5.0 MeV negativo). Nas energias do Acelerador Pelletron essas reações possuem seções de choque em torno de dezenas de milibarns com distribuição angular focalizada numa faixa larga de ângulos dianteiros. Com reações em cinemática inversa, onde o feixe mais pesado é incidido sobre um alvo leve, a focalização cinemática é melhor. A vantagem de se usar solenoides para a seleção, separação e focalização do feixe secundário reside justamente na sua larga aceitação angular de aproximadamente 30 msr (cone de 3 a 6 graus no laboratório), o que permite a focalização de praticamente 90% dos produtos. A limitação mínima de 3 graus é devido ao copo de Faraday (um longo cilindro de Tungstênio de 2.5 cm de diâmetro) que bloqueia partículas emitidas no alvo de produção entre 0 e 3 graus bem como impede a entrada do feixe primário no solenoide. A limitação máxima de 6 graus é devido a um colimador específico para limitar esse ângulo máximo. Uma vez produzido, o feixe secundário com o elemento de interesse e seus possíveis contaminantes são transportados através do primeiro solenoide, enquanto que o feixe primário é freado no copo de Faraday e tem sua carga integrada medida.

Os solenoides do sistema RIBRAS focalizam e selecionam cinematicamente os elementos produzidos através da relação de rigidez magnética  $B\rho^2 = 2mE/Q^2$ , onde  $m$ ,  $E$  e  $Q$  são a massa, energia e estado de carga das partículas, respectivamente. As partículas são então focalizadas ao longo do eixo longitudinal de acordo com o valor de  $B\rho$ , sendo necessário ajustar a intensidade do campo magnético para focalizar as

partículas de interesse no ponto do eixo desejado. Como os solenoides têm um alto poder de focalização e um grande ângulo sólido de aceitação (30 msr), é possível coletar grande parte dos núcleos produzidos no alvo de produção e focaliza-los como um feixe em um alvo ou detector localizado numa câmara de espalhamento. Ao mesmo tempo bloqueadores e colimadores eliminam os contaminantes com rigidez magnética diferente, produzindo assim feixes secundários de elementos radioativos razoavelmente intensos e com boa focalização cinemática. Veja figura 2.4.

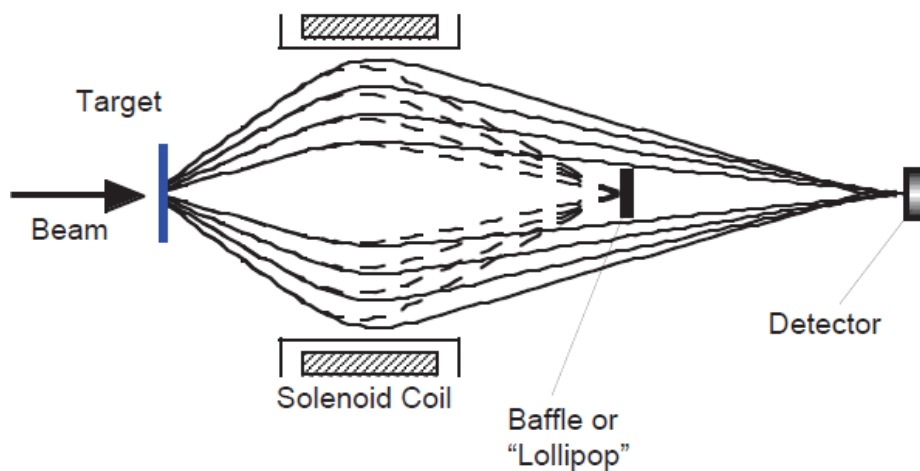


Figura 2.4 - Desenho esquemático da focalização com um solenoide finito.

Alguns feixes produzidos por esse sistema podem ter contaminações com elementos que tenham a mesma rigidez magnética que o elemento de interesse. Um sistema de colimadores e bloqueadores podem bloquear feixes que tenham uma rigidez magnética um pouco maior ou um pouco menor que o feixe de interesse, mas uma eliminação completa dos contaminantes só pode ser obtida com a utilização dos dois solenoides e com degradadores ou defletores elétricos entre eles. A utilização do segundo solenoide permite focalizar o feixe através de dois modos de operação, o modo paralelo e o modo cruzado, veja Figura 2.5. Operando no modo cruzado é possível montar um degradador no ponto de cruzamento ("crossover point") dos solenoides, alterando o valor da energia das partículas que antes possuíam a mesma combinação

de  $B_p$ . Isso é possível porque partículas com número atômico diferentes perdem quantidades diferentes de energia ao atravessar o degradador (a perda de energia de partículas carregadas num material é dada equação de Bethe-Bloch [16] que pode ser aproximada por  $\Delta E = AZ^2/E$ ). O segundo solenoide pode agora focalizar somente a partícula de interesse no alvo de reação, purificando o feixe secundário. Já o modo paralelo é usado quando precisa de uma focalização mais fina e pode ser utilizado para, por exemplo, separar contaminantes com estados de cargas diferentes usando um filtro elétrico no ponto de crossover.

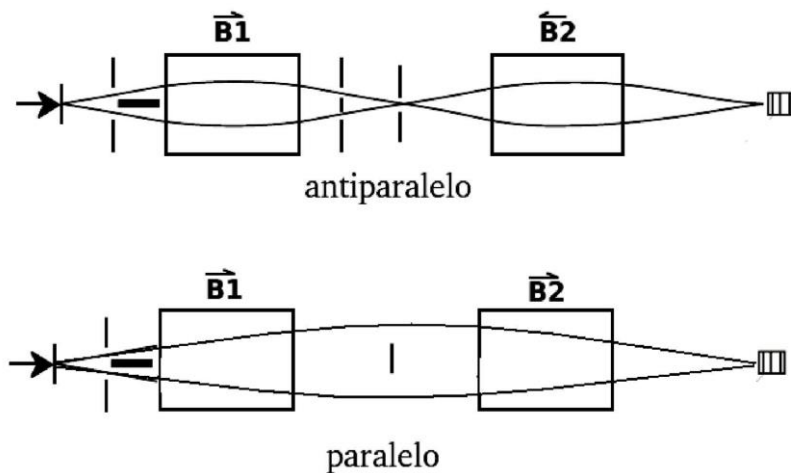


Figura 2.5 - Modos de focalização utilizando o segundo solenoide do sistema RIBRAS. Figura extraída da ref. [21].

As partículas dentro do solenoide sofrem influência da força de Lorentz dada por:

$\vec{F} = eq(\vec{v} \times \vec{B})$ , fazendo com que as partículas realizem trajetórias helicoidais como ilustrada na figura 2.6.

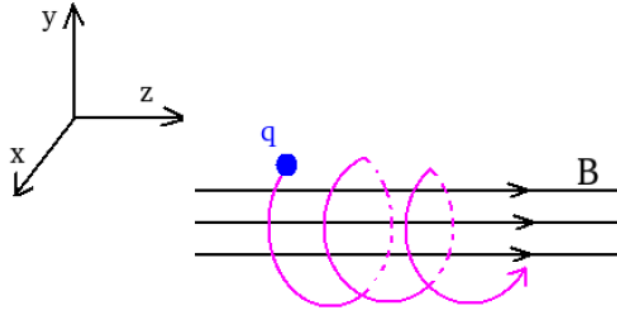


Figura 2.6 - Trajetória helicoidal de partículas carregadas em um solenoide.

Tendo em conta que um solenoide real tem um tamanho finito, existe o efeito de borda e uma componente radial do campo, cujo efeito é de focalizar as partículas. A trajetória num solenoide real é então um pouco mais complexa e é dada por uma combinação de um movimento helicoidal com um movimento radial de focalização. Isso faz com que o solenoide funcione como uma lente delgada. Na Figura 2.7 temos um gráfico esquemático da intensidade das componentes longitudinal,  $B_z$ , e radial,  $B_r$ , do campo magnético ao longo do eixo do feixe ( $z$ ). A componente longitudinal permanece praticamente constante dentro da bobina do solenoide e cai fortemente fora dela. Já a componente radial tem picos nas bordas da bobina e com sentido oposto em cada borda. No centro da bobina o campo é máximo. O valor do campo depende diretamente da corrente. No entanto o efeito de focalização depende de detalhes das bordas. O foco por sua vez depende da rigidez magnética através da relação:

$$\frac{1}{f} = \frac{B_z^2}{(B\rho)^2},$$

sendo que a rigidez magnética é dada por:

$$B\rho = \frac{mv}{q} = \frac{\sqrt{2mE}}{q},$$

onde  $E$  é a energia da partícula,  $m$  a sua massa e  $q$  o estado de carga.

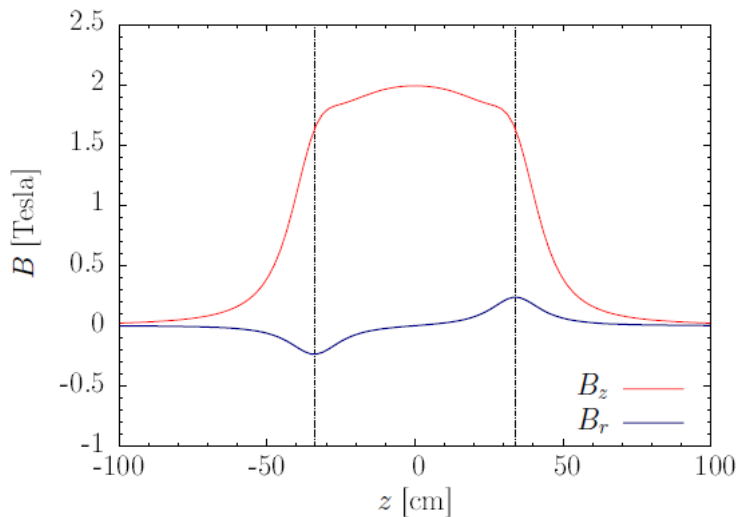


Figura 2.7 - Gráfico esquemático das componentes longitudinal e radial do campo magnético dentro de um solenoide finito.

O sistema RIBRAS foi colocado em operação em 2004. Desde então esse sistema vem produzindo feixes secundários de  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^8\text{B}$  e  ${}^{10}\text{Be}$ , conforme Tabela-1. Utilizando esses feixes foram realizadas várias experiências de espalhamento elástico e algumas reações de transferência e várias informações espectroscópicas foram obtidas para núcleos radioativos leves [14].

Tabela-1. Núcleos radioativos produzidos pelos Sistemas RIBRAS e Twinsol. As intensidades dos feixes secundários se referem a feixes primários de  $1\mu\text{A}$ .

| Reação de produção                            | Feixe secundário | Intensidade (pps) |
|---|------------------|-------------------|
| ${}^9\text{Be}({}^7\text{Li}, {}^8\text{Li})$ | ${}^8\text{Li}$  | $10^6$            |
| ${}^9\text{Be}({}^7\text{Li}, {}^6\text{He})$ | ${}^6\text{He}$  | $10^5$            |
| ${}^3\text{He}({}^6\text{Li}, {}^7\text{Be})$ | ${}^7\text{Be}$  | $10^4$            |
| ${}^7\text{Li}({}^6\text{Li}, {}^7\text{Be})$ | ${}^7\text{Be}$  | $10^4$            |
| ${}^3\text{He}({}^6\text{Li}, n){}^8\text{B}$ | ${}^8\text{B}$   | $10^4$            |

Para dar continuidade ao programa de investigações de espalhamento elástico e realização de medidas mais complexas com reações de transferência e breakup precisamos desenvolver novos feixes radioativos. Desenvolver esses novos feixes

envolve determinar qual a melhor reação de produção, fazer simulações das trajetórias, intensidades e verificar contaminações para que possamos determinar a melhor posição dos vários elementos óticos (bloqueadores, colimadores e degradadores) de purificação e realizar medidas testes para determinação da pureza e intensidade.

Para agilizar a produção de feixes radioativos que envolvem reações que ainda não foram testadas, bem como testar a utilização de diferentes degradadores e elementos óticos para purificação dos feixes secundários utilizamos cálculos de trajetórias de diferentes partículas nos campos magnéticos dos solenoides. Nesse trabalho utilizamos também um programa de simulação baseado na técnica de Monte Carlo, que será descrito a seguir.

## **3** Simulações

O desenvolvimento de novos feixes radioativos com sistemas de produção como o RIBRAS envolve a prévia determinação de vários parâmetros. O primeiro parâmetro é a escolha da reação de produção no alvo. Devemos escolher dentre as possíveis reações (transferência, fusão, fissão e outras) não apenas aquela que fornece a maior taxa de produção do elemento de interesse, mas também devemos levar em conta a quantidade e intensidade dos possíveis contaminantes. Em alguns casos devemos escolher entre alvos sólidos ou gasosos e com isso devemos levar em conta a resolução em energia, onde cálculos de perda de energia e dispersão (“straggling”) angular e de energia são importantes. Podemos então realizar cálculos de trajetórias de diversos elementos dentro dos solenoides considerando as perdas de energia, dispersão e focalização mas também podemos simular esses cálculos com método de Monte Carlo.

### 3.1 Cálculos de trajetórias

Inicialmente, para planejar uma experiência de produção de feixes radioativos podemos calcular algumas poucas trajetórias das partículas do feixe de interesse e dos possíveis contaminantes ao longo do sistema bem como suas energias, considerando todas as perdas de energia ao longo dos diversos elementos do RIBRAS. Assim, uma vez definidos o feixe de interesse e os contaminantes esperados, precisamos de cálculos de cinemática, trajetórias ao longo de todo o sistema e perda de energias nas diversas etapas. Cada um desses cálculos utiliza um código diferente. Devemos ainda realizar esses vários cálculos variando-se as correntes dos solenoides até obtermos as partículas de interesse focalizadas no ponto desejado. Com a finalidade de automatizar esses cálculos foi desenvolvido por Valdir Scarduelli um algoritmo que interliga esses diversos códigos [17]. Nesse algoritmo pode-se optar pela utilização de um alvo primário e secundário sólido ou gasoso, além de possibilitar a escolha de utilizar os solenoides em modo simples ou duplo, com os modos de focalização em paralelo ou cruzado, com o uso ou não de um degradador entre os solenoides. Para realizar esses cálculos interligados por esse algoritmo precisamos gerar um arquivo de “input” com essas informações, com os dados de qual o feixe de interesse e alguns poucos ângulos e energias de interesse. O algoritmo desenvolvido utiliza os códigos StopX (perda de energia) e Kineq (cinemática), do pacote de programas do UPAK [18], disponibilizado pelo Oak Ridge National Laboratory. O código StopX calcula perdas de energia e poder de freamento (“stopping power”) baseado em tabelas de dados experimentais de Ziegler [19], considerando ajustes e extrapolações na falta de dados nas tabelas. O código Kineq é responsável pelo cálculo de cinemática de dois corpos. O código de cálculo de trajetória das partículas foi desenvolvido na Universidade de Notre Dame [20], sendo utilizado originalmente para simular apenas o sistema de duplo solenoide Twinsol. Esse código foi adaptado para considerar a geometria e os parâmetros do



sistema RIBRAS. Primeiramente calculamos algumas trajetórias da partícula de interesse para alguns ângulos, escolhendo as correntes dos solenoides que focalizam o feixe num determinado ponto. A seguir determinamos as energias dos contaminantes a partir da relação de rigidez magnética obtida para o feixe radioativo de interesse. O algoritmo ainda gera um espectro bidimensional  $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$  com os possíveis contaminantes. Esse espectro seria uma simulação dos parâmetros perda de energia ( $\Delta E$ ) e energia residual ( $E$ ) que seriam obtidos ao se utilizar um sistema de dois detectores formando telescópios  $\Delta E$ - $E$ , onde um dos detectores é fino e as partículas atravessam e o outro um detector mais grosso que para completamente as partículas. Finalmente o algoritmo utiliza um macro latex para gerar um arquivo pdf com todos os cálculos e gráficos. Um exemplo desse tipo de cálculo de trajetória pode ser visto na Figura 3.1. Na figura mostramos apenas a metade superior da trajetória das partículas dentro do solenoide de forma esquematizada. A trajetória das partículas dentro do solenoide é bem mais complexa. As linhas verticais indicam os dois colimadores posicionados a 0.20 m e 2.21 m do alvo de produção e dois bloqueadores: o copo de Faraday a 0.31 m e o lollipop (pirulito) a 2.2 m. As flechas indicam o ponto de cruzamento entre os dois solenoides a 2.65 m, onde queremos focalizar o feixe de interesse. É esse tipo de cálculo que temos usado para verificar a corrente do solenoide que focaliza o feixe de interesse e também verificar de forma grosseira se um determinado contaminante é bloqueado. Esses cálculos fornecem apenas parâmetros iniciais que precisam ser ajustados em experiências de produção, onde um ajuste fino da corrente é necessário. Um código baseado no método de monte carlo de geração de eventos poderia ser bem mais conveniente para que possamos simular de uma forma um pouco mais próxima da realidade diversas trajetórias do feixe de interesse e contaminantes.

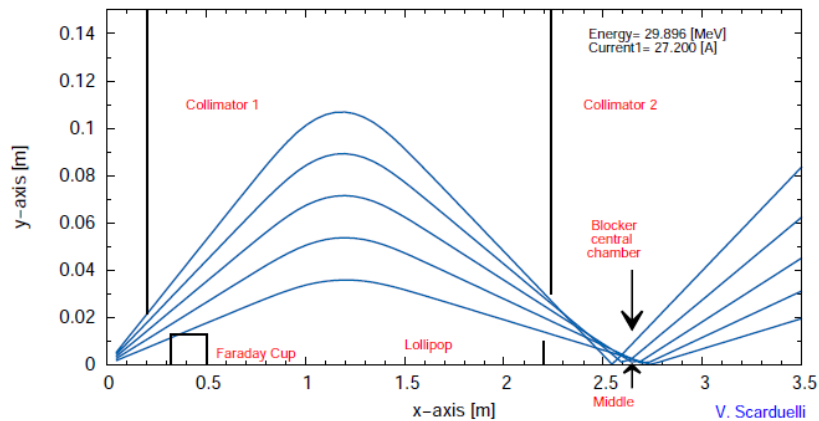


Figura 3.1 - Desenho esquemático das trajetórias das partículas após o primeiro solenoide do sistema RIBRAS.

### 3.2 Simulação Monte Carlo com a plataforma Lise++

A plataforma LISE++ [21] foi inicialmente elaborada devido a necessidade de simular a produção de elementos radioativos com o separador LISE instalado do GANIL [22] nos meados dos anos 80. A ideia foi desenvolver um programa que pudesse simular a operação dos sistemas óticos desse laboratório na separação dos diversos elementos produzidos por reações de fragmentação. O principal objetivo foi criar uma plataforma amigável no sentido de permitir que os próprios usuários do laboratório pudessem não apenas planejar suas experiências mas também utilizar a plataforma como ferramenta para otimizar as medidas durante a sua realização. Com a construção de vários outros laboratórios que também produzem feixes radioativos, a plataforma LISE++ acabou se tornando bastante utilizada e foi se tornando uma ferramenta cada vez mais elaborada. Hoje, a plataforma LISE++ é bastante versátil. A plataforma permite que todo um sistema separador de fragmentos seja construído na forma de blocos pelos próprios

usuários e o método Monte Carlo implementado permite gerar os eventos e com isso simular a produção de feixes on-line. A plataforma já tem alguns sistemas, de laboratórios que utilizam a plataforma LISE++ com mais frequência, pre-elaborados, que servem de ponto de partida. Nos últimos anos os criadores da plataforma têm se dedicado a melhorar a determinação das seções de choque de produção por fragmentação, fissão, evaporação e estão agora trabalhando na implementação de reações de dois corpos. Assim o LISE++ é uma plataforma completa com um conjunto de programas escritos em C++ formando um pacote que simula a produção de feixes radioativos e sua purificação. Nesse pacote o usuário pode construir a simulação do seu próprio sistema de produção levando-se em conta os 3 importantes ingredientes, feixe primário e alvo, mecanismo de produção e sistema de separação e focalização. O pacote permite ainda controlar a visualização e a geração dos eventos.

Na plataforma LISE++ foram implementados os seguintes filtros para separação de fragmentos:

- filtros de rigidez magnética (dipolos, quadrupolos, solenoides),
- filtros de rigidez elétrico,
- filtros de velocidade (Filtro de Wien),
- filtros de perda de energia (degradadores),
- Tempo de voo.

Com isso podemos purificar feixes secundários, otimizar separadores in-flight, criar e simular gráficos de identificação de partículas para comparação com medidas on-line. Tudo isso num ambiente de windows com versatilidade para criar diferentes configurações. Detalhes sobre as opções de cálculos implementados nessa plataforma podem ser obtidos da referência [21]. Aqui vamos apenas dar um resumo da potencialidade do LISE++

Os cálculos de perda e dispersão (“straggling”) de energia são cruciais para dedução da rigidez magnética, transmissão dos íons e determinação de suas energias e alcances em detectores. Os métodos disponíveis no LISE++ para os cálculos de perda de energia são dados por parametrizações de Ziegler como as utilizadas no TRIM e ATIMA [19,23,24]. A plataforma permite ainda que se escolha a inclinação do material com relação ao feixe, uso de resolução em energia nos cálculos, calibração dos detectores e cálculos de densidade de gases. Cálculos do estado de carga necessários para a determinação da transmissão também são levados em conta para cada bloco dispersivo incluído no sistema. Os parâmetros ópticos dos separadores podem ainda ser introduzidos manualmente como matrizes de transporte. A transmissão e emitâncias são calculadas individualmente com as matrizes de transporte de cada um dos diversos componentes ópticos. O código então calcula a matriz de transporte geral. A evolução horizontal e vertical das distribuições angulares, as distribuições espaciais e as distribuições de energia e momento são determinadas e podem ser visualizadas.

Inicialmente o único mecanismo de produção dos elementos no alvo considerado no LISE++ era a fragmentação. Isso porque esse é o principal mecanismo nas energias do laboratório GANIL, onde o LISE++ se originou. No entanto, agora temos implementado na plataforma mecanismos como fusão-evaporação, fusão-fissão, abrasão-fissão. Para energias mais baixas, como o caso do sistema RIBRAS, o que nos interessa são reações de transferência. Esse mecanismo ainda não está adequadamente implementado no LISE++. Temos a opção de escolher o mecanismo “reações de dois corpos” mas nesse caso apenas a cinemática de dois corpos é considerada de forma correta, as seções de choque de produção não são confiáveis. Para solucionar esse problema é possível colocarmos manualmente um arquivo com as seções de choque da reação de interesse. Assim sendo podemos adicionar arquivos com a distribuição angular de reações de transferência que podem ser obtidas da literatura ou pode ser calculada com modelos adequados.

Uma implementação interessante adicionada a plataforma foi a possibilidade de se levar em conta reações secundárias nos alvos de produção e em outros elementos do sistema. Em laboratórios com feixes primários de altas energias os alvos de produção são espessos o suficiente para permitir que reações secundárias ocorram. Reações que podem acontecer nos degradadores são também levados em conta pois podem ser geradores de contaminantes. Esses cálculos são opcionais.

Na nova configuração do LISE++ o usuário pode criar seu próprio sistema separador fazendo uma combinação de vários elementos (Dipolo, Imã, solenoides, colimadores, bloqueadores) num formato de blocos. Um exemplo de uma janela de diálogo com as possíveis configurações pode ser vista na Figura 3.2. Basta clicar nas diversas opções dessa janela, entrar com as informações, geometria e parâmetros dos elementos para ter um sistema de separação de feixes radioativos. Como pretendemos simular o sistema RIBRAS, devemos entrar com os parâmetros e geometrias já conhecidos e adicionar degradadores, bloqueadores e colimadores conforme a necessidade.

Em 2006 um input com o esquema do sistema de duplo solenoides da University of Notre Dame foi incorporado na plataforma LISE++ como uma das utilidades. O código de cálculos de trajetória foi transformado de Fortran para C++ e incorporado a plataforma. Outras correções também foram adicionadas como por exemplo, correções relativísticas e principalmente cálculos de matriz de transporte considerando solenoides com bordas suaves ("soft-edge"). Optamos por montar nosso próprio separador incluindo os elementos do sistema RIBRAS. Introduzimos também arquivos de seções de choque da reação de produção e num futuro poderemos incluir o mapa do campo magnético medido para obter resultados mais realistas. Discutiremos os detalhes dessa montagem no capítulo 4 de produção dos feixes específicos.

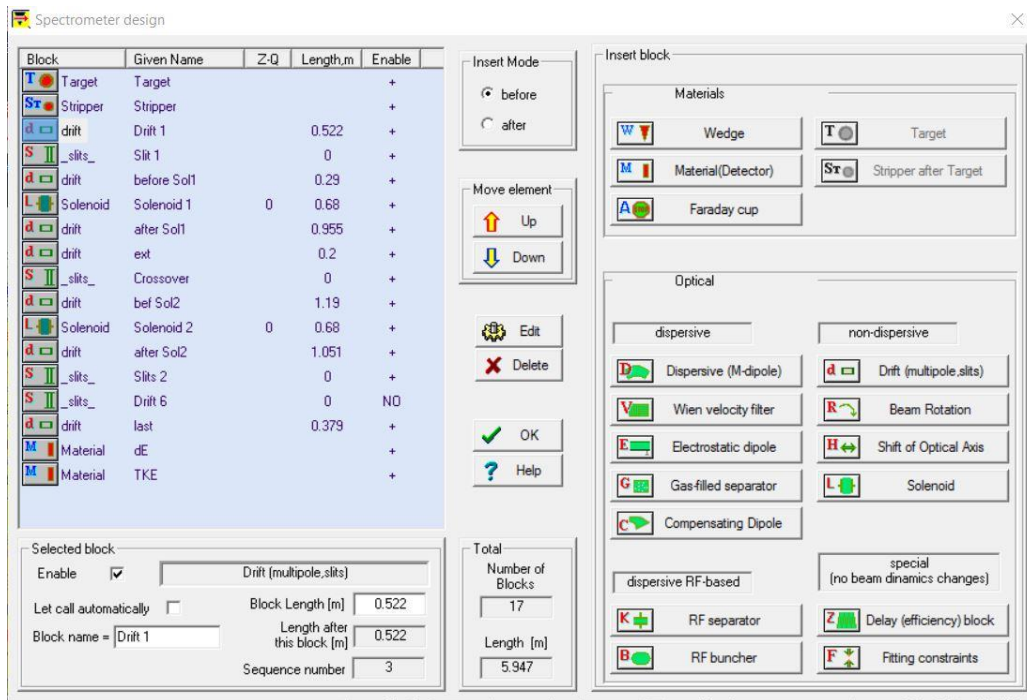


Figura 3.2 - Janela de diálogo para montar a configuração do separador desejado.

## 4 Produção de feixes radioativos

A seguir vamos detalhar o processo de se produzir alguns feixes radioativos leves. Em particular vamos nos ater na produção de feixes radioativos de  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{12}\text{B}$ ,  $^{14}\text{C}$  e  $^{15}\text{C}$ . O desenvolvimento desses feixes envolve a escolha da reação de produção, a determinação do posicionamento dos elementos ópticos do sistema RIBRAS, além da viabilidade da combinação feixe primário e alvo de produção. Devido a esses diversos fatores, e a versatilidade do sistema RIBRAS, é importante que sejam realizadas simulações de produção para que possamos otimizar a intensidade e purificação dos

feixes de interesse. No entanto, apenas uma produção experimental, com ajuste fino dos parâmetros e das correntes dos solenoides, é que podemos ter informações definitivas sobre a produção de um determinado feixe radioativo.

Ao se utilizar o sistema de duplo solenoides como o RIBRAS de São Paulo ou Twisol da University of Notre Dame, a maximização do feixe de interesse deve ser realizada em ambos os solenoides, variando-se a corrente do primeiro e do segundo solenoide monitorando a razão entre o número de contagens da partícula de interesse e o número de partículas do feixe primário.

Para os feixes radioativos de  $^{12}\text{B}$  e  $^{14}\text{C}$  temos dados experimentais referentes as suas produções e usaremos esses resultados experimentais para comparar com as simulações e cálculos de trajetórias. Para os feixes de  $^{10}\text{Be}$  e  $^{15}\text{C}$  temos apenas as simulações.

O procedimento básico para a produção de um determinado feixe radioativo pode ser dividido nas seguintes etapas:

- 1) **Escolha da reação de produção:** Selecionar a reação de produção (feixe primário e alvo). A simulação pode nos dar uma ideia de qual melhor reação.
- 2) **Energia de interesse:** Definir a energia de interesse e com isso a energia do feixe primário.
- 3) **Corrente dos solenoides:** Calcular as trajetórias da passagem do feixe secundário de interesse através dos solenoides, para encontrar valores iniciais ótimos para as correntes dos solenoides.
- 4) **Possíveis contaminantes:** Os possíveis contaminantes e suas respectivas energias podem ser determinados pela relação da rigidez magnética, determinada pela energia, massa e estado de carga do feixe radioativo de interesse. As partículas do feixe primário espalhadas também devem ser consideradas por serem o contaminante mais relevante e intenso.
- 5) **Maximização da intensidade:** Ao se utilizar o sistema de duplo solenoides, a

maximização do feixe de interesse deve ser realizada em ambos os solenoides, variando-se a corrente do primeiro e do segundo monitorando a razão entre o número de contagens da partícula de interesse e o número de partículas do feixe primário. A corrente a ser escolhida depende ainda da relação intensidade/pureza que é definida pelos colimadores, bloqueadores, degradadores.

As etapas dos procedimentos acima podem ser realizadas manualmente usando programas específicos de perda de energia, trajetórias etc, ou utilizando-se uma plataforma completa como a LISE++. Entretanto, nada substitui uma medida real onde podemos otimizar os parâmetros ou ainda fazer um ajuste fino das correntes dos solenoides.

## **4.2 Produção de feixe radioativo secundário de $^{12}\text{B}$**

A motivação para se produzir o feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  é que vamos utilizá-lo em medidas futuras de espalhamento elástico. Pretendemos medir distribuições angulares de espalhamento elástico em energias próximas a barreira Coulombiana utilizando o sistema RIBRAS. Essas medidas farão parte de um estudo sistemático que estamos realizando de espalhamento elástico em alvo de  $^{58}\text{Ni}$ . Distribuições angulares para o espalhamento elástico com os projéteis  $^{11}\text{B}$  e  $^{10}\text{B}$  em alvo de  $^{58}\text{Ni}$  foram medidas no laboratório Tandem da Argentina [25,17]. Dados referentes ao sistema  $^8\text{B}+^{58}\text{Ni}$  foram medidos na University of Notre Dame, Estados Unidos e publicados na ref. [26]. Assim, dados a serem obtidos para o sistema  $^{12}\text{B}+^{58}\text{Ni}$  serão interessantes para completarmos essa sistemática com isótopos de Boro. Em particular, uma análise comparativa do espalhamento elástico com o isótopo de  $^{12}\text{B}$  rico em nêutrons e  $^8\text{B}$  rico em prótons como projétil será bastante interessante. Vale ressaltar que o isótopo  $^8\text{B}$  é considerado um núcleo exótico com halo de próton. Nosso objetivo principal na produção do feixe de  $^{12}\text{B}$



é a intensidade já que medidas de espalhamento elástico não requer alta pureza do feixe secundário. Nesse caso, podemos identificar as partículas usando combinações de parâmetros perda de energia ( $\Delta E$ ) e energia residual ( $E$ ) obtidos com o uso de detectores formando telescópios  $\Delta E$ - $E$  ou com medidas do tempo de voo e energia (TOF- $E$ ). O principal desafio na produção do feixe secundário radioativo de  $^{12}\text{B}^{5+}$  é eliminar a presença do contaminante  $^{11}\text{B}^{5+}$ , que seriam as partículas espalhadas do feixe primário. Em resumo, precisamos então ter o máximo de intensidade com o mínimo de contaminação das partículas de espalhamento elástico.

Aplicando então o procedimento acima descrito na seção anterior para a produção de feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  temos:

**Etapa-1 (Escolha da reação de produção):** Para a produção do feixe radioativo ricos em nêutron  $^{12}\text{B}$  podemos usar duas reações,  $^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{12}\text{B})^8\text{Be}$   $Q=+1.70$  MeV e  $^2\text{H}(^{11}\text{B},^{12}\text{B})^1\text{H}$   $Q=+1.15$  MeV. Ambas reações correspondem a transferência de um nêutron e têm um  $Q$ -de-reação levemente positivo. A reação de pickup de um nêutron,  $^9\text{Be}(^AX,^{A+1}X)^8\text{Be}$ , é uma reação interessante do ponto de vista experimental pois resulta num  $^8\text{Be}$  no canal de saída. Com isso o  $Q$ -de-reação é em geral positivo, fornecendo uma energia cinética extra para os núcleos residuais, e portanto, para o feixe secundário de interesse. Temos usado uma reação desse tipo,  $^9\text{Be}(^7\text{Li},^8\text{Li})^8\text{Be}$ , para produzir o feixe radioativo de  $^8\text{Li}$  com uma intensidade da ordem de  $10^5$  a  $10^6$  pps, para  $1\mu\text{A}$  de feixe primário de  $^7\text{Li}$ . Vamos então adotar a reação  $^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{12}\text{B})^8\text{Be}$  como reação de produção do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$ , mesmo porque não temos disponível o alvo de deutério necessário para utilizar a reação  $^2\text{H}(^{11}\text{B},^{12}\text{B})^1\text{H}$ .

**Etapa-2 (Energia de interesse):** Vamos então considerar um feixe primário de  $^{11}\text{B}$  com  $E(^{11}\text{B}) = 34.1$  MeV de energia incidindo em um alvo sólido de  $^9\text{Be}$  com  $13.2\ \mu\text{m}$  de espessura. Esse é o valor da energia do feixe primário utilizado durante a experiência de produção do feixe de  $^{12}\text{B}$  realizada. Considerando as perdas de energia do feixe

primário e secundário no alvo de produção, calculadas com o código stopx, cinemática da reação, onde o  $^{12}\text{B}$  é emitido entre os ângulos 2 e 6 graus (ângulos de aceitação do solenoide), temos uma energia para o feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  igual a  $E(^{12}\text{B}) = 29.9 \text{ MeV}$ , antes do solenoide (energia calculada).

**Etapa-3 (Correntes solenoides):** Os cálculos de trajetória para o  $^{12}\text{B}$  com essa energia através de apenas um solenoide e para os ângulos 2, 3, 4, 5 e 6 graus podem ser vistos na figura 4.1. Obtivemos que a corrente do primeiro solenoide que melhor focaliza o feixe  $^{12}\text{B}$  de 29.9 MeV entre  $I_{\text{SOL1}}=27.2$  a 27.3 A.

**Etapa-4 (Possíveis contaminantes):** Com o valor da energia, da carga e massa do feixe de interesse podemos calcular o valor da rigidez magnética  $(B\rho)^2=EA/Q^2$ , que para o  $^{12}\text{B}$  de  $E(^{12}\text{B})=29.9 \text{ MeV}$ ,  $A=12$  e  $Q=5$ , fornece o valor  $(B\rho)^2=14.4$ . Com essa rigidez magnética podemos estimar as energias dos possíveis contaminantes que teriam a mesma rigidez magnética. Considerando a massa e carga dos possíveis contaminantes podemos determinar sua energia e a perda de energia num sistema de detecção,  $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$ . Nesse caso as intensidades dos contaminantes são artificiais já que não estamos levando em conta suas reações de produção. No entanto, mesmo com intensidades artificiais, esse gráfico calculado poderá nos ajudar na identificação dos contaminantes que poderiam estar presentes no “cocktail” de feixes ao compara-lo com o espectro experimental. Veja a Figura-4.2.

**Etapa-5 (Intensidade e pureza).** Essa etapa depende das etapas anteriores mas pode ser obtida com cálculos de trajetórias e com simulação utilizando a técnica Monte Carlo, como a ser aplicada com a plataforma LISE++ e descrita abaixo. No entanto, como já foi mencionado apenas com medidas experimentais de produção é que podemos ter os valores finais e reais. Com as informações das etapas de 1 a 4 podemos iniciar medidas experimentais.

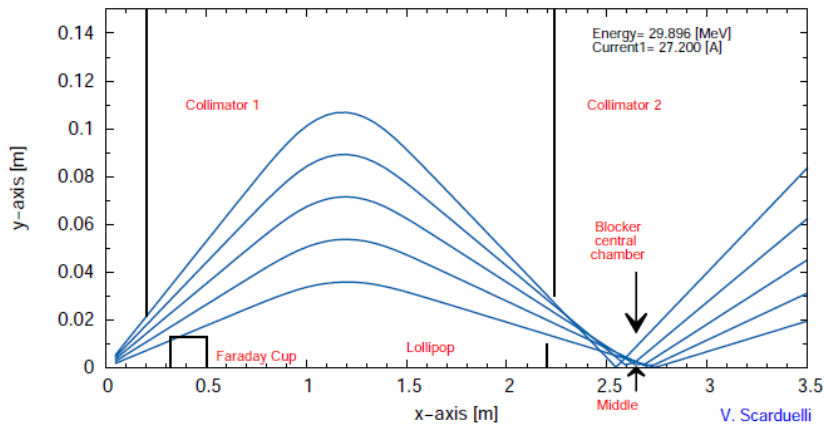


Figura 4.1 - Figura com os cálculos de trajetórias para o  $^{12}\text{B}$  de 29.9 MeV através de apenas um solenoide e para os ângulos 2, 3, 4, 5 e 6 graus. A focalização se dá a 2.65 m do alvo de produção.

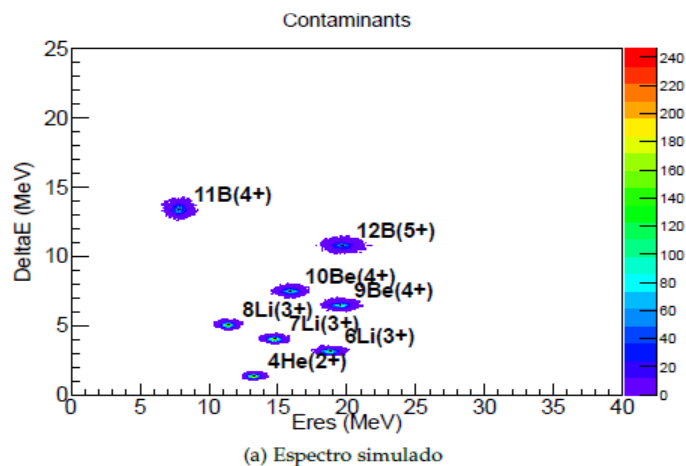


Figura 4.2 - Espectro  $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$  estimado com os contaminantes que são aceitos pelo solenoide com a mesma rigidez magnética. As intensidades de cada contaminante são artificiais.

O principal contaminante para o feixe radioativo de  $^{12}\text{B}^{5+}$  é o feixe primário espalhado no alvo de produção  $^{11}\text{B}^{5+}$ . Para esse contaminante temos sempre uma especial atenção. O contaminante formado por partículas provenientes do espalhamento elástico tem uma intensidade da ordem de  $10^6$  a  $10^7$  vezes maior que o feixe de partículas proveniente da reação de transferência. Para reações de transferência de nêutrons com Q-de-reação positivo as partículas do espalhamento elástico terão uma energia menor que as partículas da reação de transferência e, portanto, uma rigidez magnética menor. Se essa diferença em energia for menor que 1 MeV essas partículas espalhadas podem ser eliminadas por bloqueadores do sistema

RIBRAS. O problema é que devido a intensidade alta desse contaminante  $^{11}\text{B}^{5+}$  do espalhamento podemos ter partículas da extremidade da distribuição de energia, com energias altas o bastante para passar pelos bloqueadores e serem ainda aceitas pelo solenoide. O posicionamento e tamanho (raio) dos bloqueadores é que vão definir a eliminação parcial ou total dessas partículas, que por sua vez vai depender de fatores como energia das partículas e perda de energia no alvo de produção.

Realizamos medidas para produção do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  utilizando o sistema RIBRAS de São Paulo. Nessas medidas o feixe primário de  $^{11}\text{B}$  foi acelerado com uma energia de  $E(^{11}\text{B}) = 34.1 \text{ MeV}$  pelo acelerador Pelletron, incidindo em um alvo sólido de  $^9\text{Be}$  de aproximadamente  $13.2 \mu\text{m}$  de espessura. Utilizamos nessas medidas apenas o primeiro solenoide. Como estávamos mais interessados em medidas de espalhamento elástico, a intensidade do feixe radioativo é mais importante que sua pureza. A utilização do segundo solenoide seria mais útil em combinação com um degradador no ponto intermediário entre os dois solenoides (“crossover point”). Como o principal contaminante é o feixe primário de  $^{11}\text{B}^{5+}$  espalhado no alvo de produção, ambos feixes ( $^{12}\text{B}^{5+}$  e  $^{11}\text{B}^{5+}$ ) têm o mesmo número atômico,  $Z$ , e praticamente a mesma energia (o  $Q$ -de-reação da reação de produção é apenas um pouco positivo). Nesse caso o uso de bloqueadores e colimadores são mais eficientes na separação das duas partículas do que uso de degradadores. Nessas medidas o sistema de detecção consistiu em um telescópio com dois detectores, um fino de  $19 \mu\text{m}$  e outro mais espesso de  $500 \mu\text{m}$  de espessura, respectivamente, instalado exatamente no “crossover point”, numa câmara em vácuo. As partículas atravessam o primeiro detector mais fino,  $\Delta E$ , e param no segundo detector mais grosso,  $E_{\text{RESIDUAL}}$ . Essas informações são utilizadas para construirmos um gráfico bidimensional  $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$  como o mostrado na Figura 4.2, onde poderemos identificar os contaminantes. Uma figura com o esquema do setup utilizado nas medidas pode ser visto na Fig. 4.3. Um típico espectro bidimensional  $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$  experimental obtido durante as medidas pode ser visto na Figura 4.4. A

comparação do espectro  $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$  calculado, mostrado na Figura 4.2, com o espectro experimental, mostrado na Figura 4.4, nos ajudou a identificar os contaminantes. O  $^{11}\text{B}$  mostrado na Figura 4.4 é também proveniente do feixe primário mas possui um estado de carga 4+.

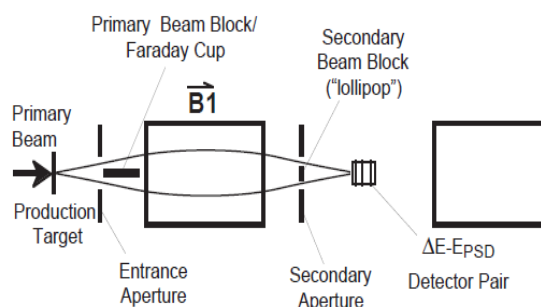


Figura 4.3 - Desenho esquemático do setup utilizado nas medidas de produção do feixe secundário de  $^{12}\text{B}$ . Figura extraída da ref. [20].

Conforme já mencionado o principal contaminante do feixe de  $^{12}\text{B}$  corresponde a partículas espalhadas do feixe primário  $^{11}\text{B}^{5+}$ . Essas duas partículas tem energias muito próximas, sendo que os valores estimados são  $E(^{12}\text{B}^{5+}) = 29.9 \text{ MeV}$  e  $E(^{11}\text{B}^{5+}) = 28.5 \text{ MeV}$ , respectivamente, antes do primeiro solenoide. Como a separação de energia é maior do que  $1.0 \text{ MeV}$  podemos, a princípio, eliminar esse contaminante com bloqueadores. Uma corrente mais baixa nos solenoides permitiria a passagem de partículas de  $^{11}\text{B}^{5+}$ . Então, para verificarmos a presença desse contaminante e confirmar sua eliminação variamos a corrente do solenoide desde um valor menor até um valor maior do que a corrente considerada ótima. No nosso caso variamos entre  $I_{\text{SOL}} = 27.0$  e  $27.8 \text{ A}$  e analisamos a projeção em energia do grupo na região das partículas do  $^{12}\text{B}$ . Colocamos os resultados dessas projeções juntos com resultados de cálculos da trajetória em função da corrente do solenoide. A ideia é verificar se os cálculos de trajetórias são consistentes com os resultados experimentais em termos de eliminação das partículas de espalhamento elástico. Essas comparações podem ser vistas nas Figuras 4.5 a 4.13.

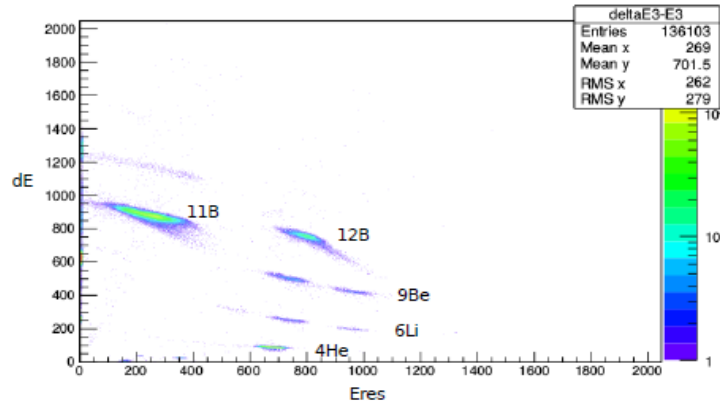


Figura 4.4 - Típico espectro  $\Delta E \times E_{RESIDUAL}$  obtido durante as medidas da produção do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$ . As partículas do feixe de  $^{12}\text{B}$  e os contaminantes foram espalhados por um alvo de Au e medidas a 20 graus.

A partir de uma análise dessa comparação podemos tirar algumas conclusões. O efeito do bloqueador posicionado em 2.2 m a partir do alvo de produção é crucial para a eliminação das partículas espalhadas de  $^{11}\text{B}^{5+}$ . Tanto a transmissão quanto a qualidade da focalização do feixe de  $^{12}\text{B}$  não se altera significativamente para o intervalo de corrente entre 27.0 e 27.4 A. A melhor focalização do feixe de  $^{12}\text{B}$  se dá no intervalo de corrente  $I_{\text{SOL}}=27.12$  a 27.25 A. Por outro lado, a eliminação completa das partículas de espalhamento ( $^{11}\text{B}$ ) se dá para  $I_{\text{SOL}}>27.38$  A (cálculo) e  $I_{\text{SOL}}>27.45$  A (experimental). Podemos então concluir que para eliminar as partículas espalhadas do feixe primário de  $^{11}\text{B}^5$  devemos sacrificar um pouco a qualidade da focalização e escolher uma corrente do solenoide em torno de  $I_{\text{SOL}}=27.4$  A. Outra possibilidade é aumentarmos o tamanho do bloqueador colocado a 2.2 m de 0.15 cm para 0.2 cm de raio.

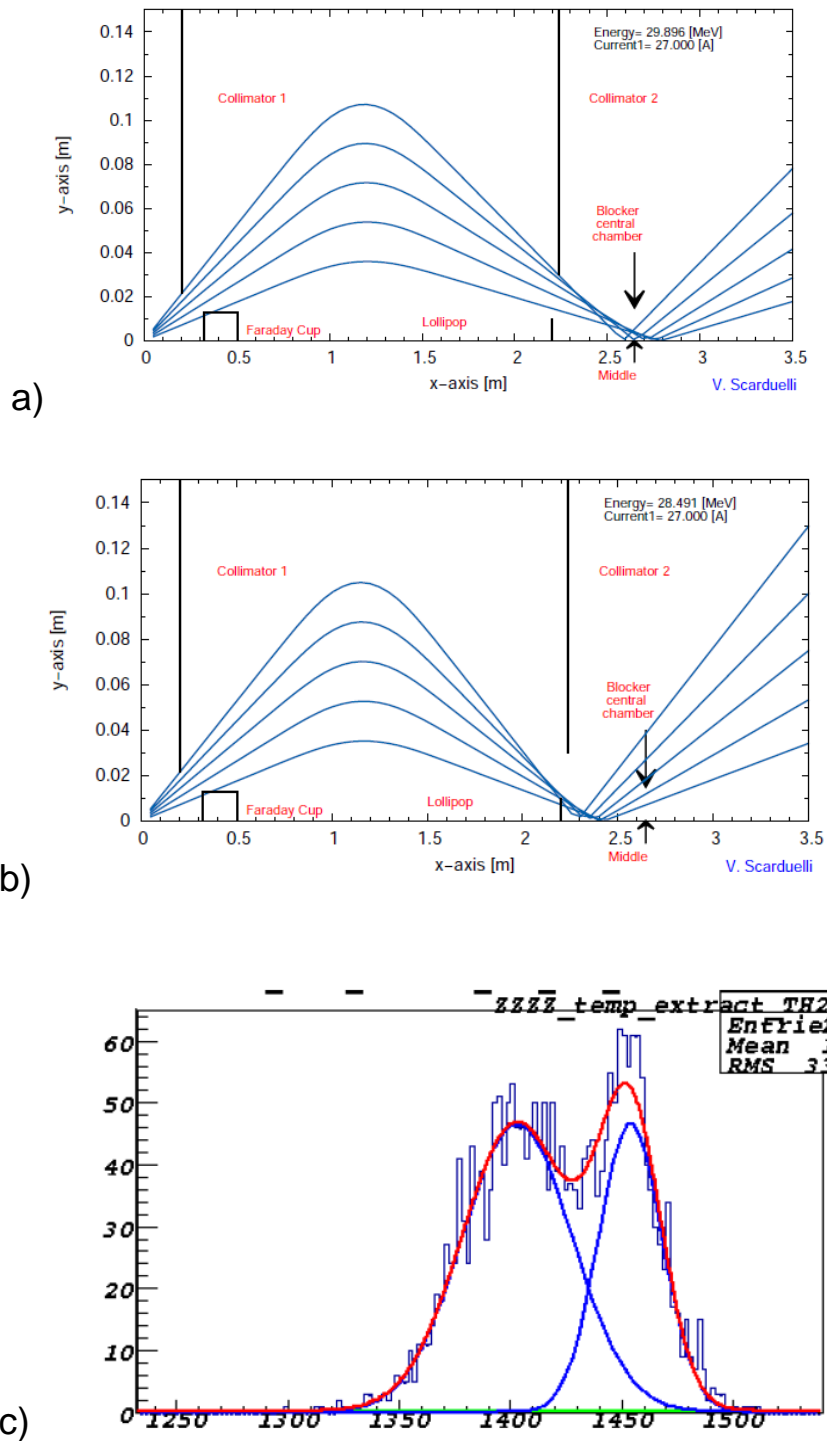


Figura 4.5 - a) e b) Cálculo de trajetória e c) projeção em energia do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  e feixe espalhado de  $^{11}\text{B}$  para  $I_{\text{sol}} = 27.008 \text{ A}$ . Podemos notar que o foco para as partículas de  $^{12}\text{B}$  é bom mas temos a presença considerável de partículas de  $^{11}\text{B}$  que ainda passam pelo bloqueador colocado a 2.2 m.

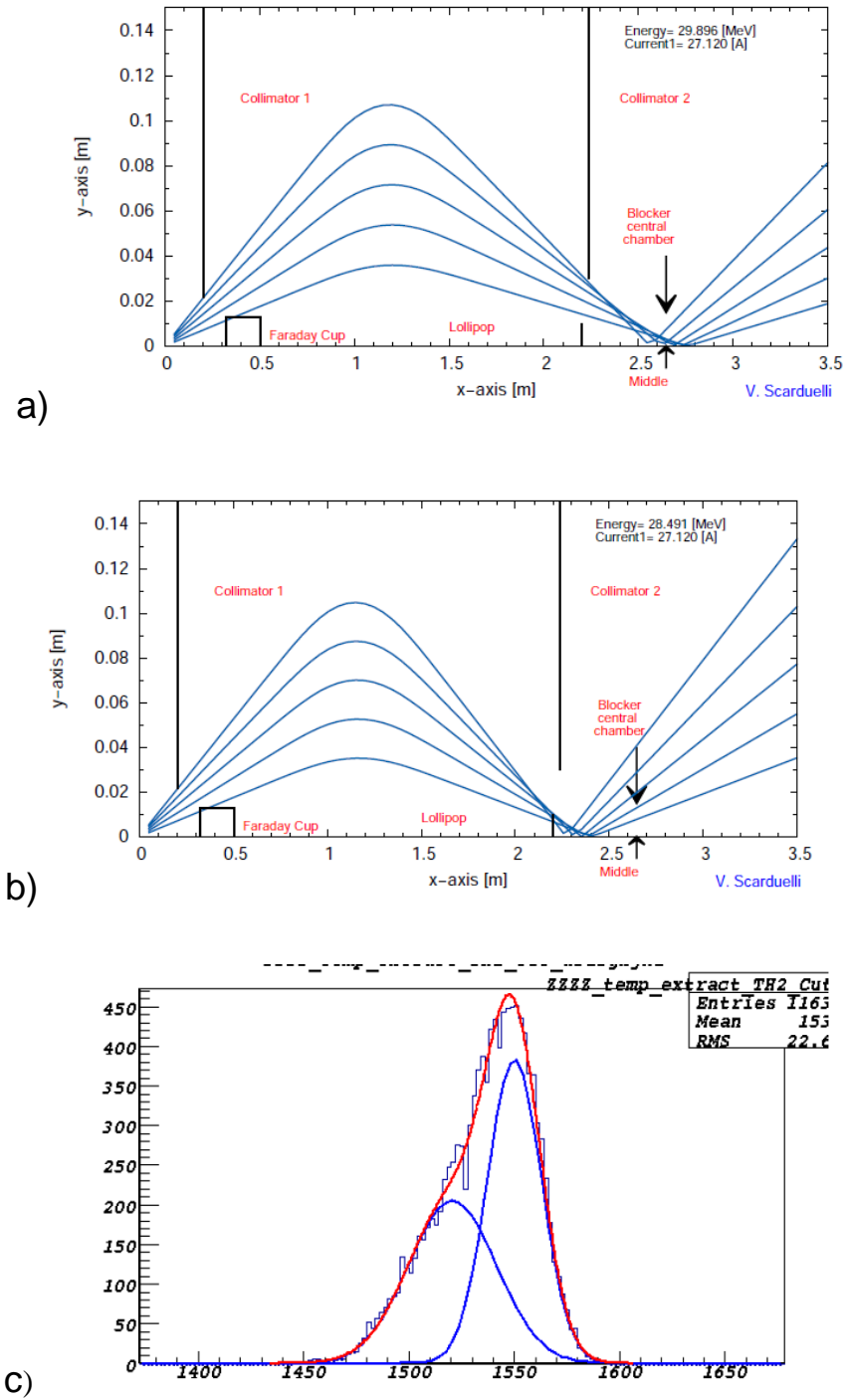


Figura 4.6 - **a)** e **b)** Cálculo de trajetória e **c)** projeção em energia do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  e feixe espalhado de  $^{11}\text{B}$  para  $I_{\text{sol}} = 27.12 \text{ A}$ .



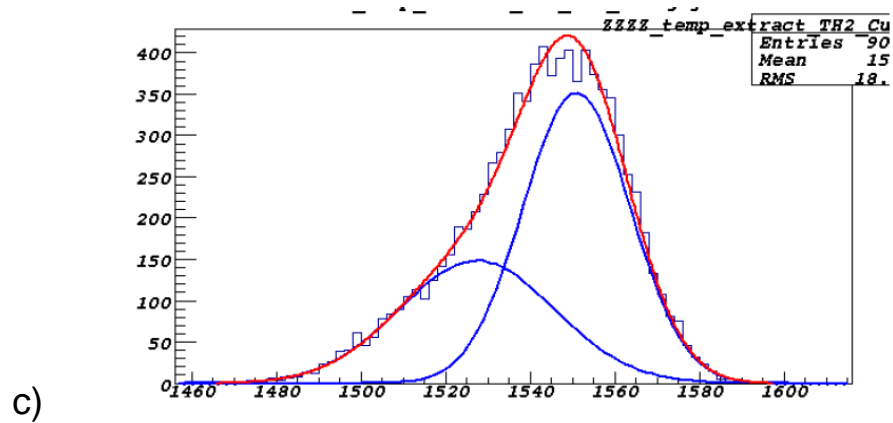
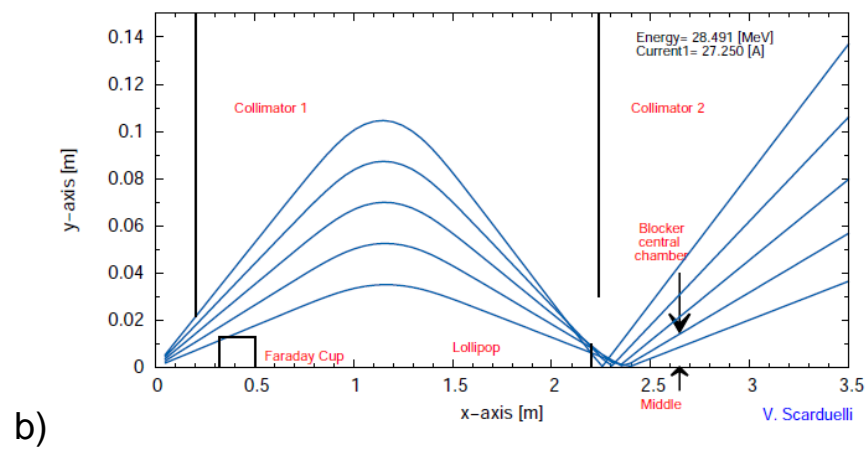
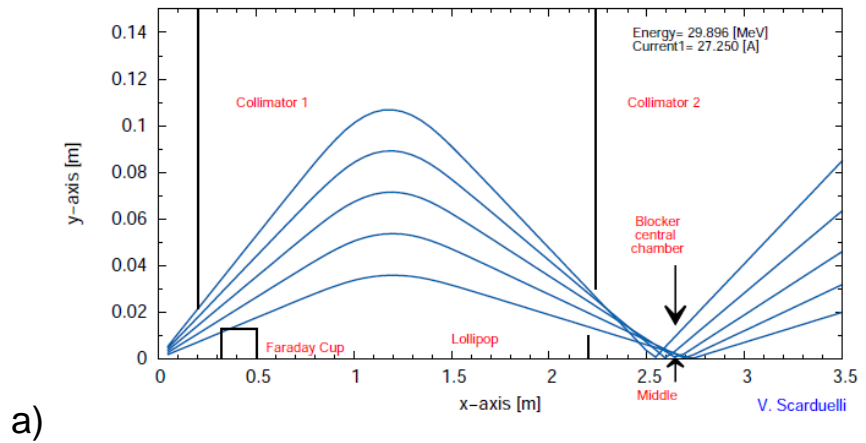


Figura 4.7 - a) e b) Cálculo de trajetória e c) projeção em energia do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  e feixe espalhado de  $^{11}\text{B}$  para  $I_{\text{sol}} = 27.252 \text{ A}$ .

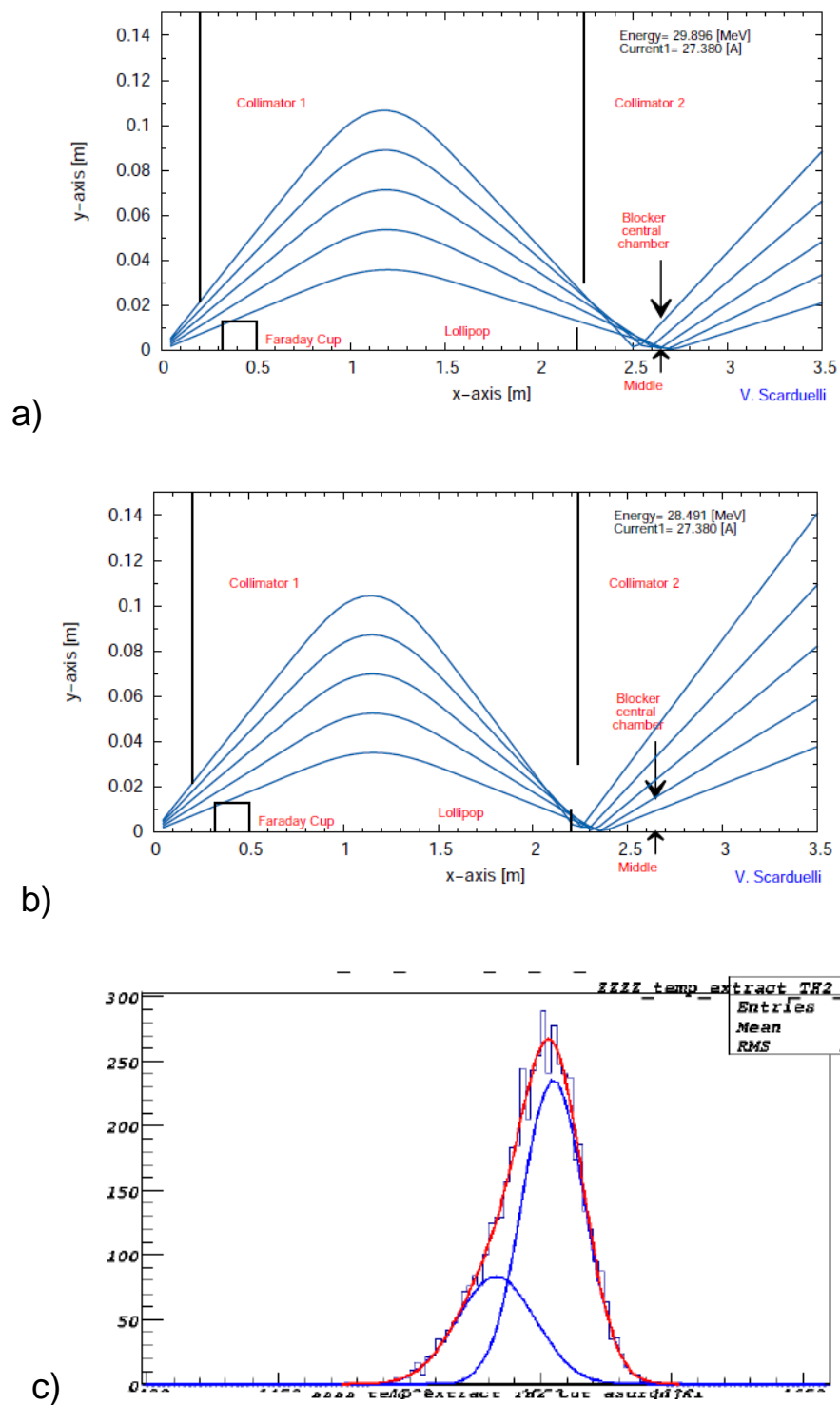


Figura 4.8 - **a)** e **b)** Cálculo de trajetória do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  e feixe espalhado de  $^{11}\text{B}$  para  $I_{\text{sol}}=27.376$  A. **c)** projeção em energia de  $^{12}\text{B}$  e  $^{11}\text{B}$ .

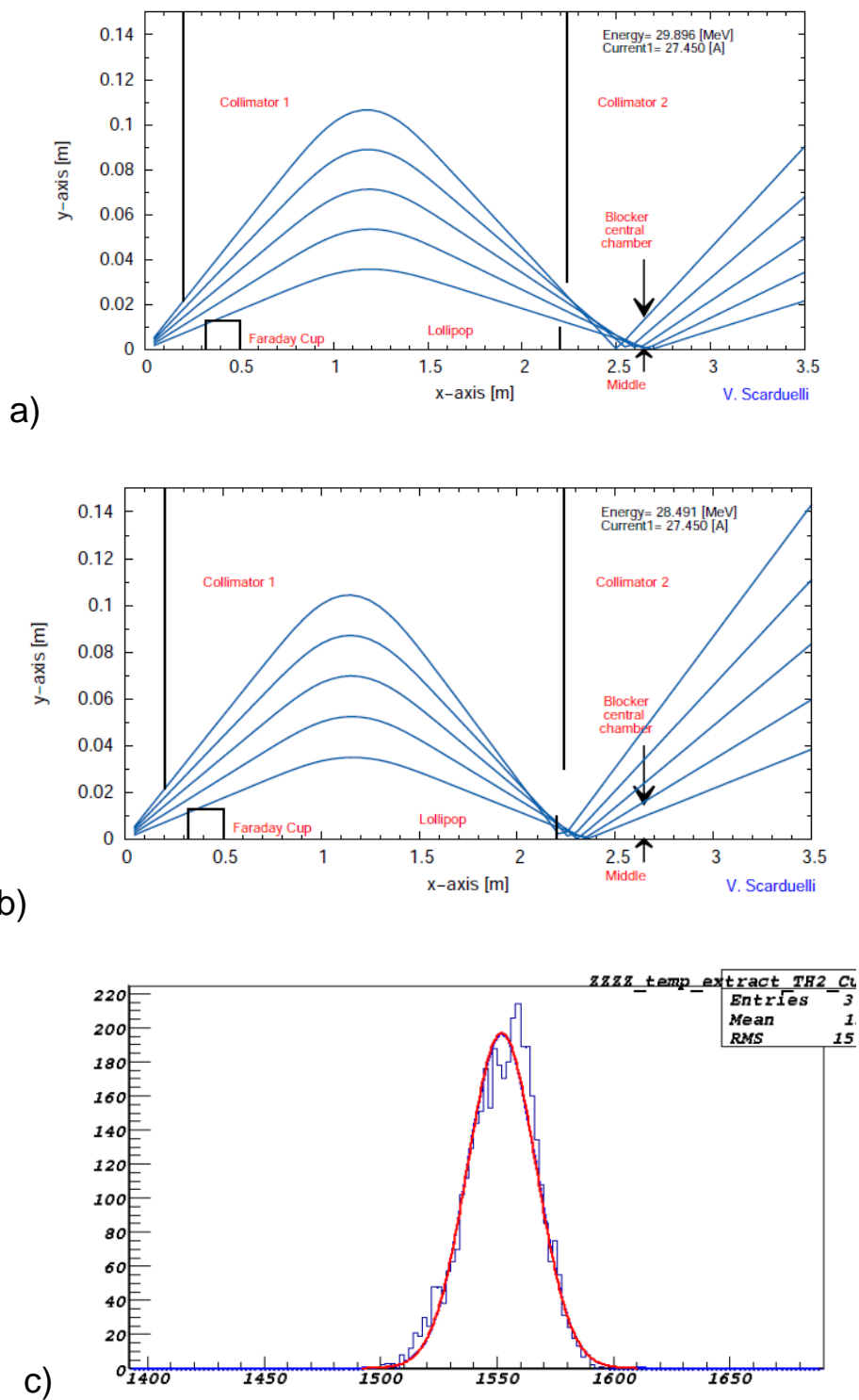


Figura 4.9 - **a)** e **b)** Cálculo de trajetória do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  e feixe espalhado de  $^{11}\text{B}$  para  $I_{\text{sol}} = 27.451 \text{ A}$ . **c)** projeção em energia de  $^{12}\text{B}$ .

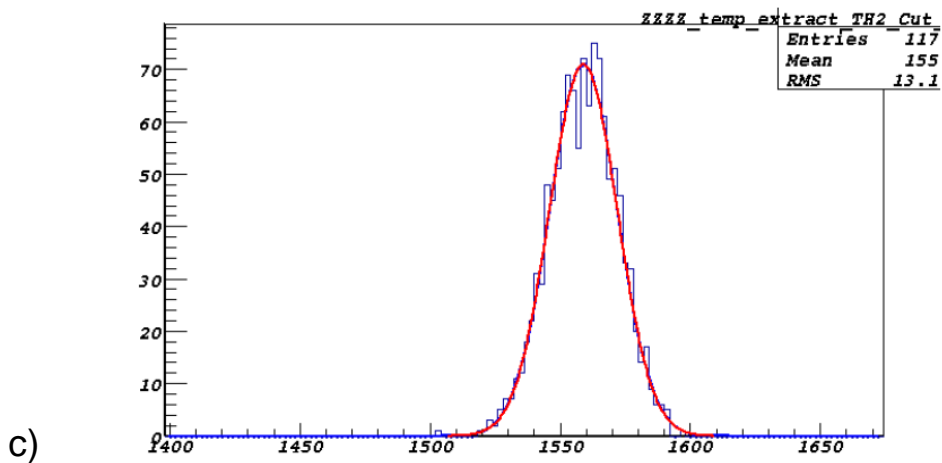
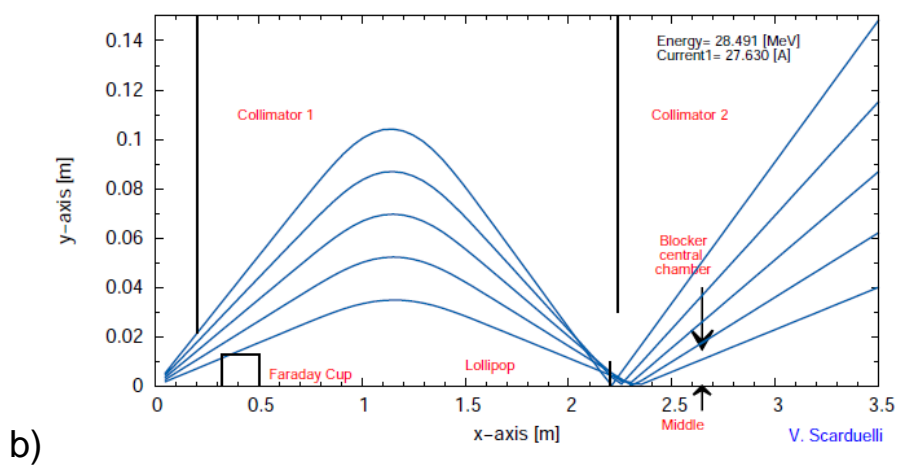
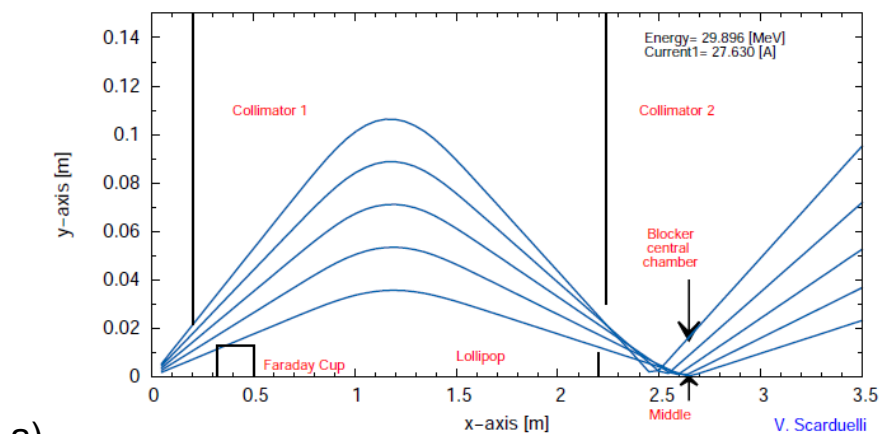


Figura 4.10 - a) e b) Cálculo de trajetória do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  e feixe espalhado de  $^{11}\text{B}$  para  $I_{\text{sol}}=27.633\text{ A}$ . c) projeção em energia de  $^{12}\text{B}$ .

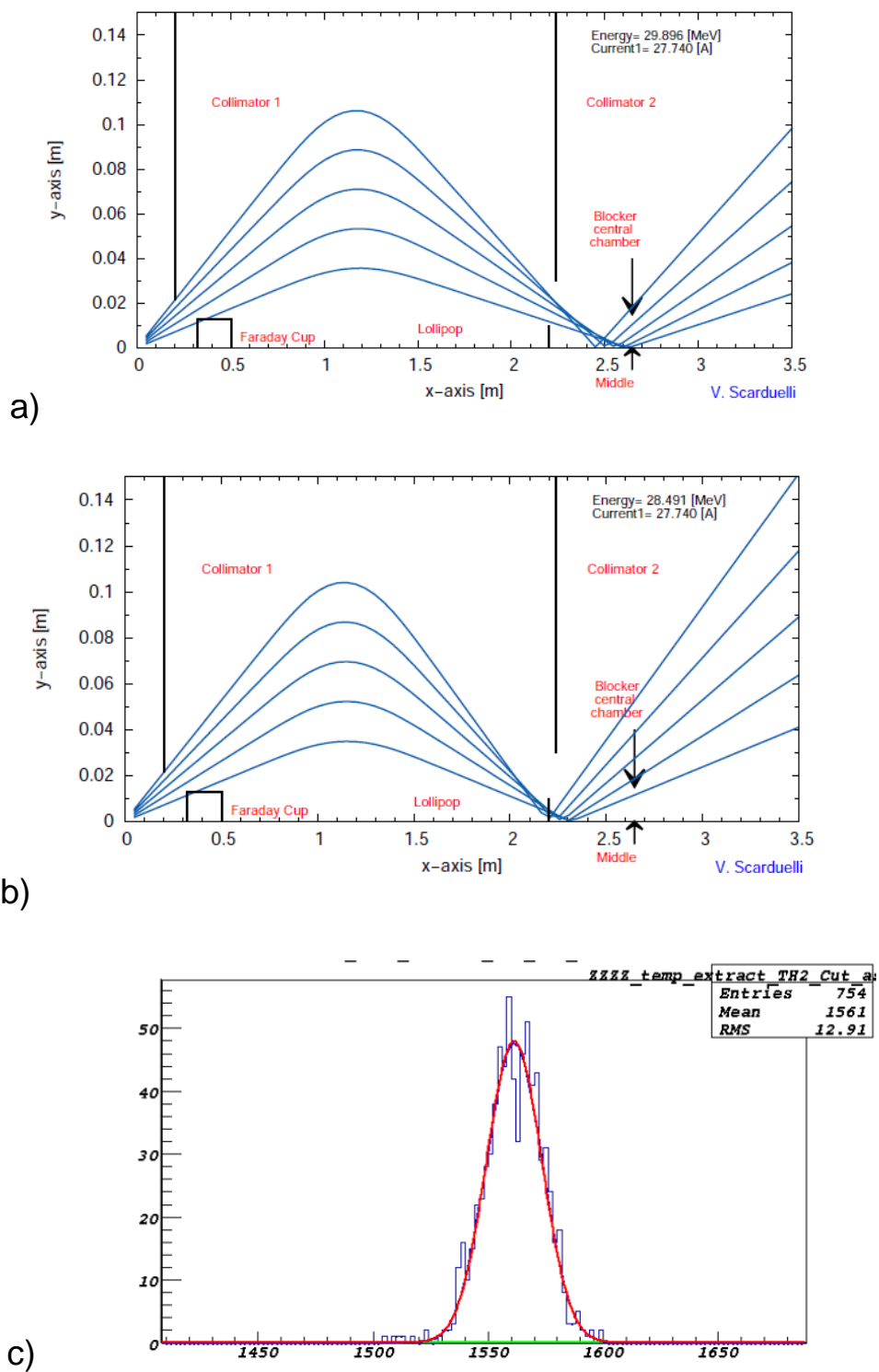


Figura 4.11 - **a)** e **b)** Cálculo de trajetória do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  e feixe espalhado de  $^{11}\text{B}$  para  $I_{\text{sol}}=27.739\text{ A}$ . **c)** projeção em energia de  $^{12}\text{B}$ .

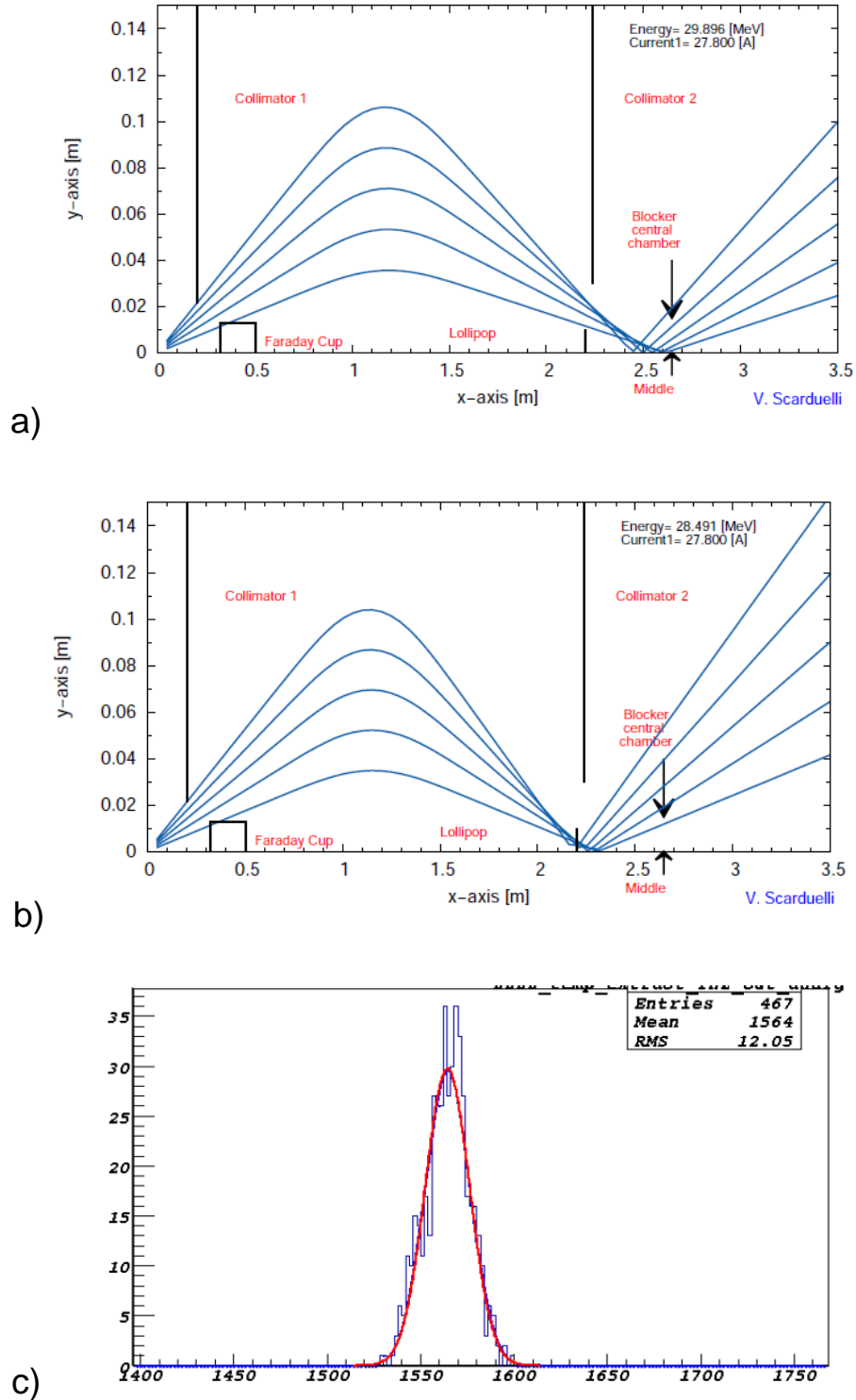


Figura 4.12 - **a)** e **b)** Cálculo de trajetória do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  e feixe espalhado de  $^{11}\text{B}$  para  $I_{\text{sol}}=27.802\text{ A}$ . **c)** projeção em energia de  $^{12}\text{B}$ .

Apesar desses cálculos de trajetórias serem úteis, os colimadores e bloqueadores poderiam ser melhor testados com um gerador de eventos com o método de Monte Carlo. Isso pode ser feito agora utilizando-se a plataforma LISE++. Com essa plataforma podemos criar nosso próprio sistema de produção de feixes radioativos e simular as diversas condições. Temos ainda a vantagem de poder introduzir um arquivo com as seções de choque para as reações de produção podendo obter resultados um pouco mais realistas do que simples cálculos de cinemática e trajetórias. Criamos então com a plataforma LISE++ um sistema separador de duplos-solenoides com os parâmetros do sistema RIBRAS. Primeiramente criamos um sistema utilizando apenas um solenoide. A lista com os blocos utilizado está na Figura 4.13 enquanto que um desenho esquematizado do sistema simulado pode ser visto na Figura 4.14.

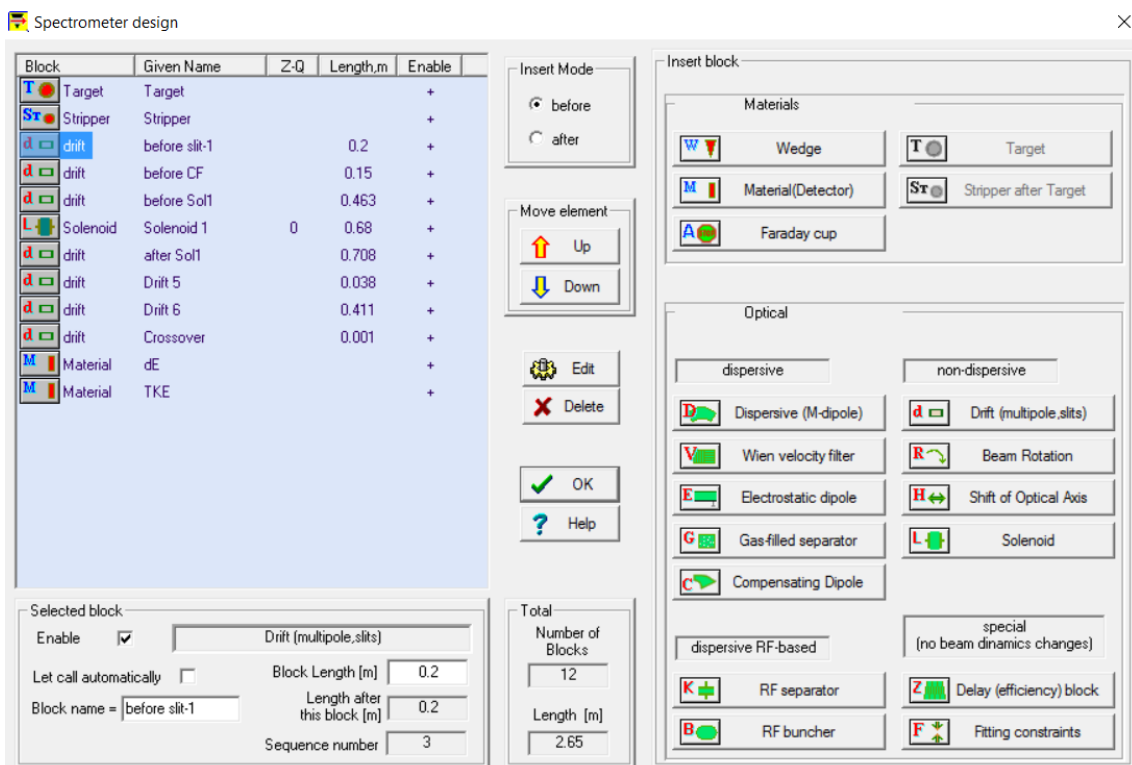


Figura 4.13 - Janela da plataforma LISE++ indicando os blocos utilizados na simulação do sistema RIBRAS.



*Figura 4.14 - Desenho esquemático do sistema RIBRAS simulado na plataforma LISE++. O bloco azul representa o alvo, dourado o solenoide, branco o colimador e rosa os detectores.*

Na Tabela-2 listamos os elementos incluídos nessa simulação com seus respectivos parâmetros geométricos. O colimador antes do solenoide, que define o máximo ângulo aceito no solenoide de 6.0 graus, foi incluído ajustando-se as aberturas para o Drift “Before CF” para 37 mm de raio. O ângulo mínimo de 3.0 graus é definido no RIBRAS pelo copo de Faraday, que funciona como um bloqueador. Por último temos um colimador bastante restritivo de 5 mm de raio no ponto de cruzamento (“crossover point”). Esse colimador restringe a colimação do feixe que atinge o alvo. Na simulação, tanto o copo de Faraday como o bloqueador Lollipop, antes da câmara com os detectores, foram incluídos como “GATES” na janela que controla os cálculos de Monte Carlo.

O elemento solenoide finito na plataforma LISE++ é complexo. Os parâmetros geométricos de tamanho e abertura são importantes mas o efeito de borda influencia muito os resultados. A plataforma faz correções da borda suave nos solenoides mas para simularmos o sistema RIBRAS de uma forma mais realista precisamos adicionar o mapa de campo magnético fora do solenoide. Como não temos esse mapa a disposição no momento nós alteramos artificialmente o raio da bobina para que o campo máximo no meio do solenoide possa reproduzir os dados experimentais para o feixe de  $^{12}\text{B}$ . O valor nominal para o raio da bobina é 0.19 m com um campo máximo de 1.722 Tesla para a corrente de 27.3 A. Alteramos o raio da bobina para 0.143 m e obtivemos um campo máximo de 1.815 Tesla para uma corrente de 27.3 A. Essa é a corrente que



focaliza o feixe de  $^{12}\text{B}$  de 29.2 MeV. Essa energia é um pouco menor do que a energia 29.9 MeV calculada com cinemática e perda de energia no alvo de produção. Verificamos que a energia para o  $^{12}\text{B}$  obtida pela simulação LISE++ é 0.7 MeV menor que a calculada pelo código de stopx devido a diferença no modelo utilizado nos cálculos de perda de energia. Esse valor também foi obtido após testarmos o resultado para várias combinações de projéteis e alvo.

O resultado da simulação da trajetória (envelope) para o feixe de  $^{12}\text{B}$  ao longo do solenoide, com os parâmetros dos elementos definidos na Tabela-2 e com uma corrente do solenoide de  $I_{\text{SOL}}=27.3$  A pode ser visto na Figura 4.15. Nessa figura ainda não aplicamos os GATES que simulam os bloqueadores. O resultado da aplicação do GATE-1 que corresponde ao copo de Faraday e do GATE-2 que corresponde ao Lollipop, podem ser vistos nas Figuras 4.16 e 4.17, respectivamente. O “X” que aparece na figura 4.17 é devido a poucas partículas com ângulos pequenos. Elas não afetam nossos resultados e poderiam ser facilmente eliminada aumentando-se um pouco o raio do lollipop (GATE-2).

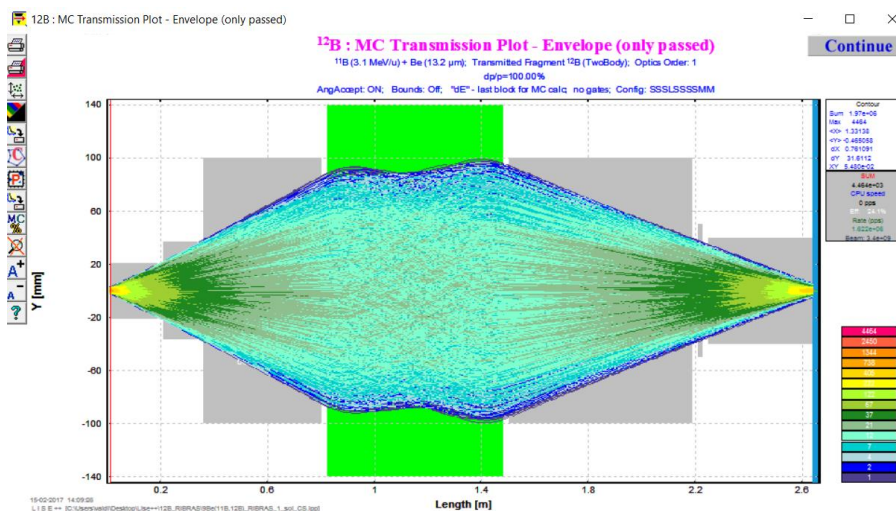


Figura 4.15 - Resultado da simulação com LISE++ da passagem (envelope) do feixe radioativo  $^{12}\text{B}$  de 29.2 MeV e para corrente do solenoide  $I=27.3$  A. A focalização se dá no ponto 2.65 m do alvo de produção. Nessa figura ainda não aplicados os GATES que simulam os bloqueadores.

Tabela-2: Parâmetros dos elementos para simulação Lise++ com o sistema RIBRAS.

|    | Elemento | Nome          | Espessura (mm)     | Abertura (raio) (mm) | Posição (metros) |
|----|----------|---------------|--------------------|----------------------|------------------|
| 1  | Target   | 9Be           | 13.2 $\mu\text{m}$ |                      | 0.000            |
| 2  | Drift    | Before Slit-1 | 200                | 21                   | 0.200            |
| 3  | Drift    | Before CF     | 150                | 37                   | 0.350            |
| 4  | Drift    | Before Sol1   | 463                | 100                  | 0.813            |
| 5  | Solenoid | Sol1          | 680                | 140                  | 1.493            |
| 6  | Drift    | After Sol1    | 707                | 124                  | 2.200            |
| 7  | Drift    | Drift-5       | 38                 | 50                   | 2.238            |
| 8  | Drift    | Drift-6       | 410                | 40                   | 2.649            |
| 9  | Drift    | Crossover     | 1                  | 5                    | 2.650            |
| 10 | Material | DE            | 20 $\mu\text{m}$   |                      | 2.650            |
| 11 | Material | TKE           | 500 $\mu\text{m}$  |                      | 2.650            |
| 12 | GATE-1   | Copo Faraday  |                    | $\pm 18.5$           | 0.350            |
| 13 | GATE-2   | Lollipop      |                    | $\pm 17.5$           | 2.200            |

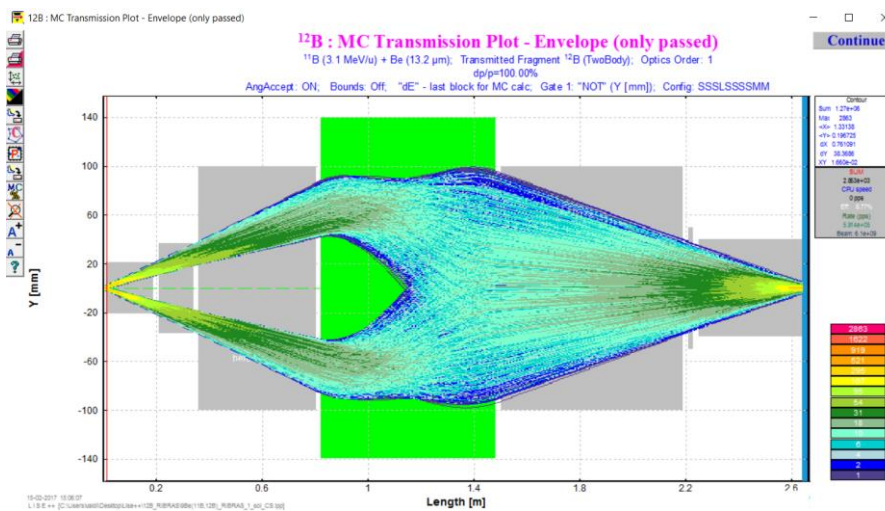


Figura 4.16 - Resultado da simulação com Lise++ da passagem (envelope) do feixe radioativo  $^{12}\text{B}$  de 29.2 MeV e corrente do solenoide  $I=27.3$  A. O GATE-1 ( $\pm 18.5\text{mm}$ ) em 0.350 m foi adicionado. Esse gate simula o copo de Faraday bloqueando partículas emitidas entre 0 e 3 graus.

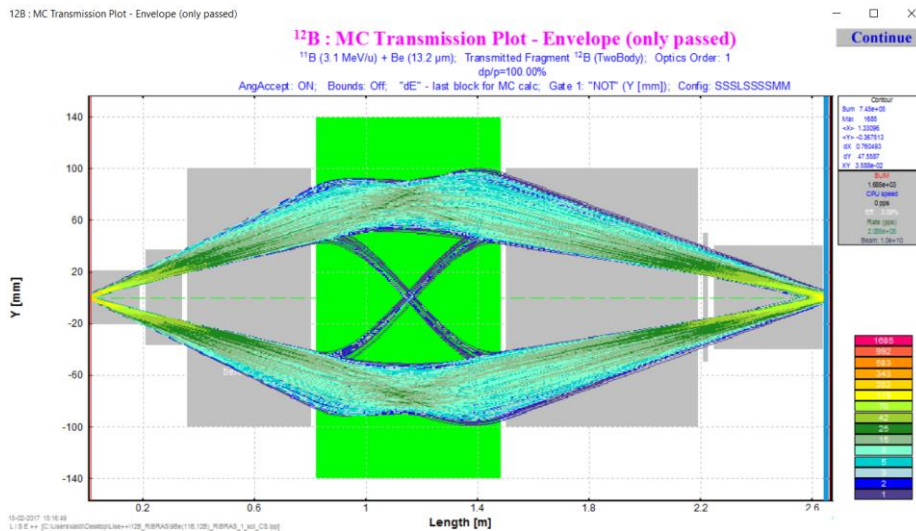


Figura 4.17 - Resultado da simulação com Lise++ da passagem (envelope) do feixe radioativo  $^{12}\text{B}$  de 29.2 MeV pelo sistema com uma corrente do solenoide  $I=27.3$  A. Foi adicionado o GATE-1 ( $\pm 18.5\text{mm}$ ) em 0.350 m e o GATE-2 ( $\pm 17.5\text{mm}$ ) em 2.2 m. Esses gates simulam o copo de Faraday bloqueando partículas emitidas entre 0 e 3 graus e o Lollipop que bloqueia as partículas com rigidez magnética menor que o feixe focalizado.

Podemos agora estudar o efeito dos GATES 1 e 2 na eliminação das partículas de feixe primário  $^{11}\text{B}^{+5}$  espalhado na contaminação do feixe de  $^{12}\text{B}$ . Essas simulações podem ser comparadas com os cálculos de trajetórias da Figuras 4.5 a 4.12.

Para a corrente 27.0 A realizamos simulações de trajetória para o  $^{12}\text{B}$  (Figura 4.18), trajetória para as partículas de  $^{11}\text{B}$  (Figura 4.19), gráfico  $\Delta E$ -E para ambas partículas (Figura 4.20) e o gráfico X versus Y (Figura 4.21), que nos dá informações sobre o foco. As figuras de trajetória mostradas são também chamadas de “envelope” em função da variável Y. Como podemos observar das figuras 4.18 e 4.21, o foco para o  $^{12}\text{B}$  não é muito bom para essa corrente. Para essa corrente temos a presença de um pouco de partículas espalhadas de  $^{11}\text{B}^{+5}$  que ainda conseguiram passar pelo bloqueador Lollipop posicionado em 2.2 m e definido pelo GATE-2 ( $\pm 17.5$ ). O grupo de partículas formando um “X” na curva de envelope corresponde a partículas sendo emitidas em ângulos pequenos. Elas podem ser facilmente eliminadas aumentando-se um pouco os GATES-1 e 2.

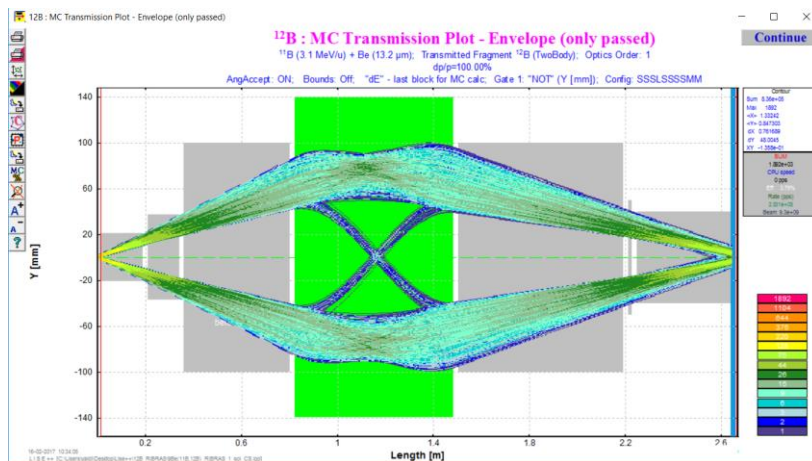


Figura 4.18 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  pelo sistema para  $I_{\text{SOL-1}}=27.0\text{ A}$ .

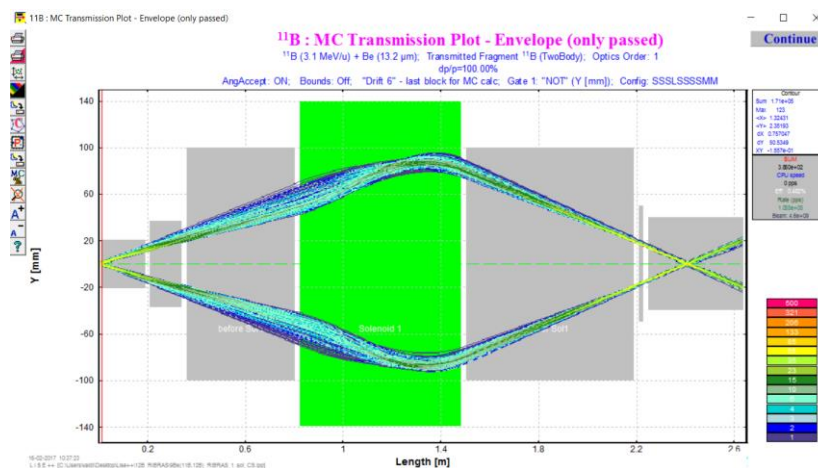


Figura 4.19 - Simulação da passagem (envelope) do feixe primário espalhado de  $^{11}\text{B}$  pelo sistema para  $I_{\text{SOL-1}}=27.0\text{ A}$ .

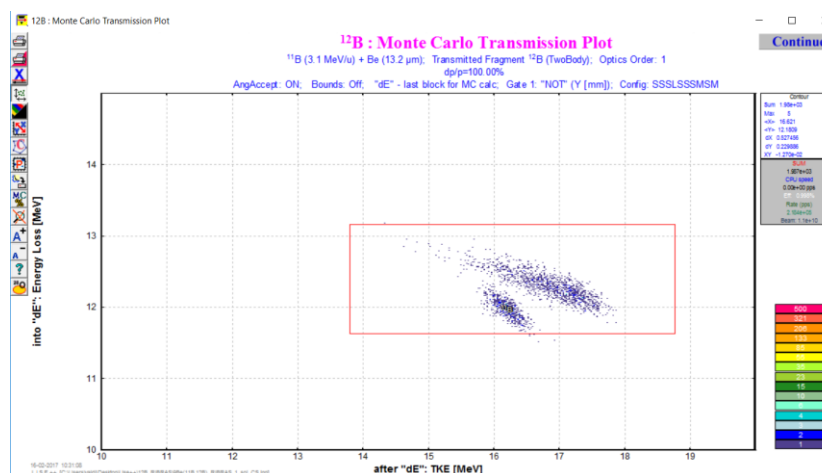


Figura 4.20 - Simulação do gráfico  $\Delta E$ -E para partículas de  $^{12}\text{B}$  e  $^{11}\text{B}$  para  $I_{\text{SOL-1}}=27.0\text{ A}$ .

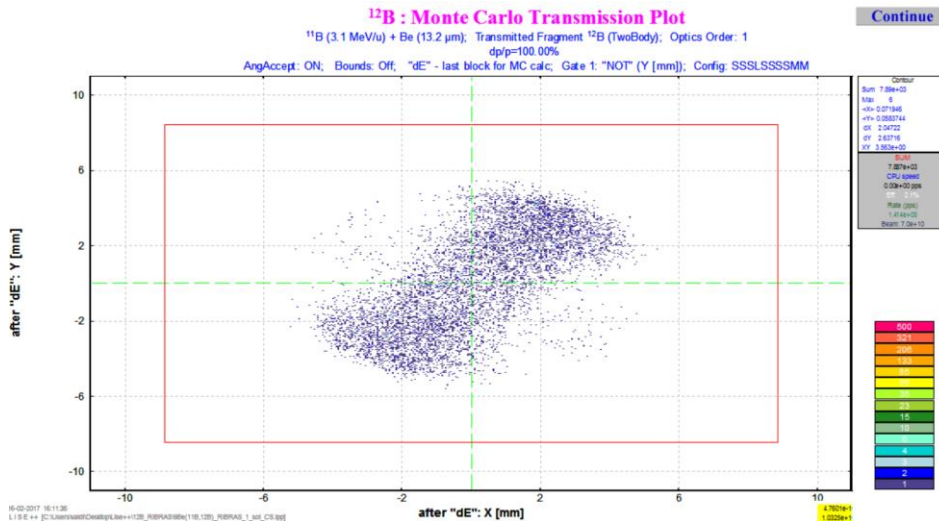


Figura 4.21 - Simulação da posição X versus Y para partículas de  $^{12}\text{B}$  para  $I_{\text{SOL-1}}=27.0$  A.

Para a corrente de 27.3 A temos a simulações de trajetória para o feixe de  $^{12}\text{B}$  e para as partículas de  $^{11}\text{B}$  (Figura 4.22), gráfico  $\Delta E$ -E (Figura 4.23) e o gráfico X versus Y (Figura 4.24). O foco para o  $^{12}\text{B}$  em 2.65 m está bem melhor. As partículas espalhadas de  $^{11}\text{B}^{+5}$  são focalizadas antes, em aproximadamente 2.4 m, e são bloqueadas pelo Lollipop. Nessa figura podemos ver ainda essas partículas porque o gate do Lollipop (GATE-2 de  $\pm 17.5$ ) não está ativo. Se ativarmos esse gate não teremos nenhuma partícula  $^{11}\text{B}^{+5}$  atravessando o colimador no ponto de cruzamento e chegando no detector. O tamanho do foco mostrado na Figura 4.20 indica que a abertura de 5 mm de raio para o colimador no ponto de cruzamento é exatamente o necessário para deixar o feixe passar. Isso ajuda na maximização do feixe.

Para corrente do solenoide de  $I_{\text{SOL}}= 27.6$  A a trajetória do  $^{12}\text{B}$  é mostrada na Figura 4.25. O foco para do  $^{12}\text{B}$  está antes do que deveria, indicando que essa corrente é maior do que a desejada. Nessa figura podemos novamente ver as partículas espalhadas do  $^{11}\text{B}$  apenas porque o gate do Lollipop não está ativo. Se ativarmos esse gate não teremos nenhuma partícula  $^{11}\text{B}^{+5}$  chegando no detector.



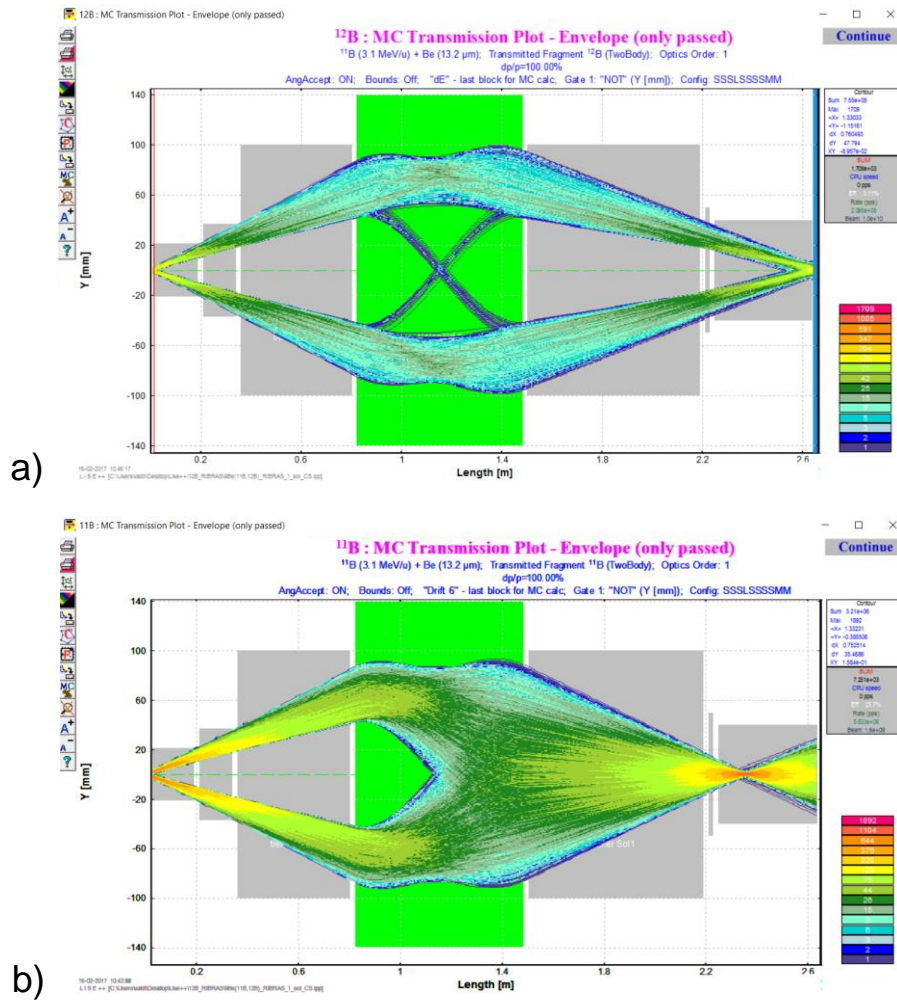


Figura 4.22 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de a)  $^{12}\text{B}$  e b)  $^{11}\text{B}$  pelo sistema RIBRAS para  $I_{\text{SOL-1}}=27.3 \text{ A}$ .

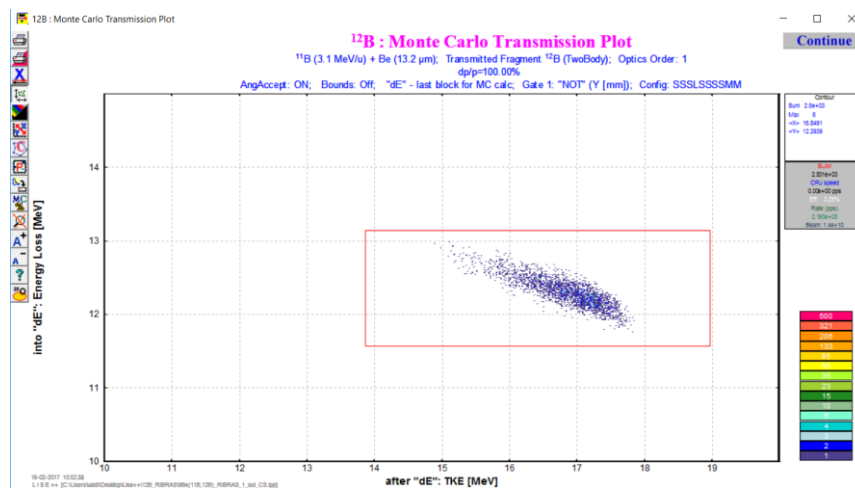


Figura 4.23 - Simulação do gráfico  $\Delta E$ - $E$  ( $19\mu\text{m}$  e  $500\mu\text{m}$ ) para partículas de  $^{12}\text{B}$  e  $^{11}\text{B}$  para  $I_{\text{SOL-1}}=27.3 \text{ A}$ .

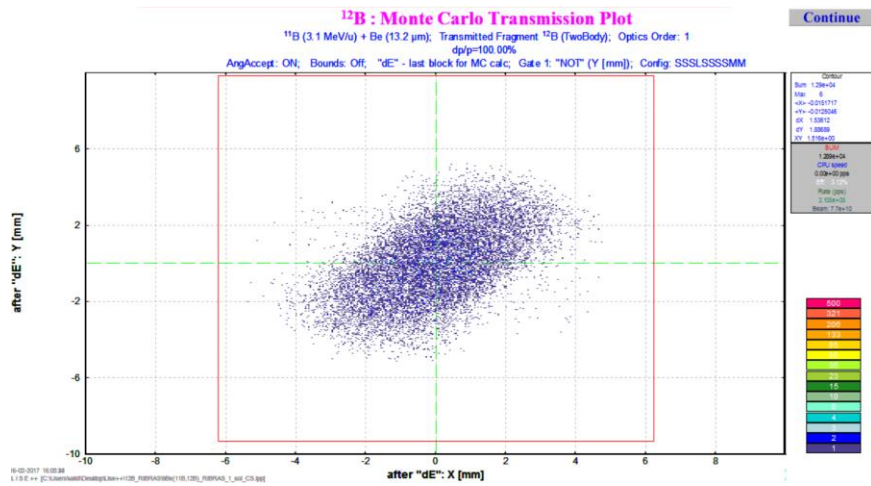


Figura 4.24 - Simulação do gráfico Y versus X para partículas de  $^{12}\text{B}$  para  $I_{\text{SOL-1}}=27.3$  A. Esse gráfico mostra o foco no ponto de cruzamento em 2.650 m. Podemos observar que as partículas estão abaixo do limite 5 mm de raio definido pela abertura do colimador no ponto de cruzamento.

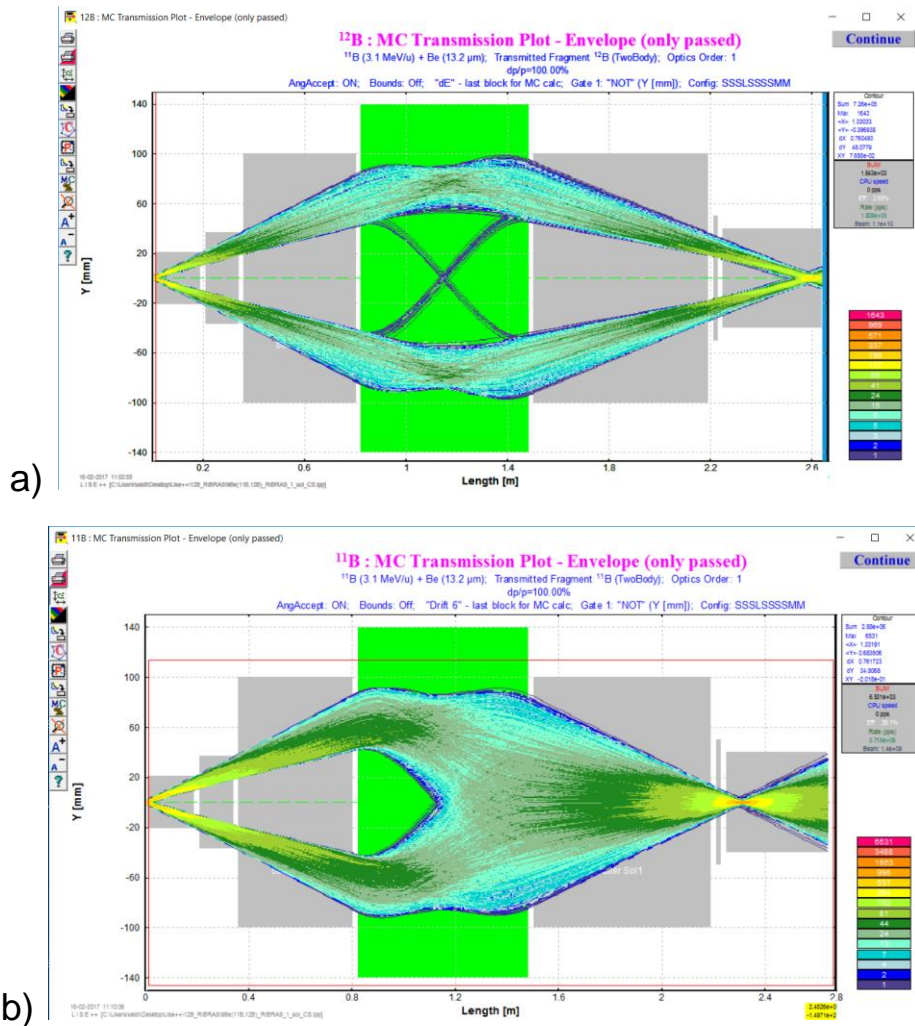


Figura 4.25 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  a) e  $^{11}\text{B}$  b) pelo sistema para  $I_{\text{SOL-1}}=27.6$  A.

Com as simulações descritas verificaremos que os parâmetros utilizados na plataforma LISE++ funcionou de forma adequada e reproduziu a situação obtida pelas medidas para a produção do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$ . A seguir verificamos a influência dos componentes ópticos como bloqueadores e colimadores, raio de abertura dos colimadores e raio dos bloqueadores na produção do feixe de  $^{12}\text{B}$ . Sabemos que os componentes mais importantes desse sistema são o colimador de 5 mm de raio no ponto de cruzamento em 2.65 m e bloqueador Lollipop com 17.5 mm de raio em 2.20 m. Temos ainda o colimador após o solenoide-1 com 50 mm de raio em 2.24 m que poderia bloquear partículas emitidas com grandes rigidez magnética. No entanto, para verificarmos os efeitos desses componentes precisamos ter uma taxa de produção confiável.

Para obter uma taxa de produção mais confiável e próxima da taxa real para testarmos os componentes precisamos da seção de choque da reação de produção em função do ângulo para a energia considerada. Para a produção do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$  utilizamos a reação de transferência de nêutrons  $^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{12}\text{B})^8\text{Be}$ , e para o espalhamento elástico,  $^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{11}\text{B})^9\text{Be}$ . Após uma análise na literatura verificamos que não temos dados experimentais na energia de interesse disponível. Então obtivemos as seções de choque de espalhamento elástico e transferência através de cálculos e vamos fazer uma análise de produção mais qualitativa. Para descrever o processo de espalhamento elástico podemos recorrer a aplicação de modelos fenomenológicos como o modelo de potencial óptico. Tal modelo assume um potencial complexo que descreve a distribuição angular para o espalhamento. Neste trabalho usamos como potencial nuclear um potencial double-folding chamado potencial de São Paulo [27], no qual leva em consideração a interação efetiva nucleon-nucleon, princípio de bloqueio de Pauli e uma pequena dependência com a energia. O Potencial de interação entre dois núcleos é então obtido através da integral da densidade de nucleons. O potencial de São Paulo pode ser facilmente calculado para os núcleos interagentes por código disponível.



O modelo óptico nos dá uma boa descrição do processo de espalhamento elástico, no entanto, para o tratamento das reações de transferência utilizadas como reações de produção temos que considerar a Teoria de Ondas Distorcidas (Distorted-Wave Born Approximation) [28]. Para a produção do feixe de  $^{12}\text{B}$  utilizamos a reação de transferência de um nêutron,  $^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{12}\text{B})^8\text{Be}$ . Nesses cálculos de transferência devemos considerar os potenciais que descrevem o espalhamento para os canais de entrada,  $^{11}\text{B}+^9\text{Be}$ , e canal de saída,  $^{12}\text{B}+^8\text{Be}$ . Um outro parâmetro importante é o fator espectroscópico que diz a respeito da configuração do núcleo. Precisamos do fator espectroscópico do nêutron dentro do núcleo original,  $^9\text{Be}=n+^8\text{Be}$ , e do nêutron no núcleo final,  $^{12}\text{B}=n+^{11}\text{B}$ . Neste trabalho vamos considerar o potencial de São Paulo, que podem ser calculados para cada sistema, para os potenciais dos núcleos interagentes na reação de transferência tanto do canal de entrada quanto do canal de saída. Vamos considerar também fatores espectroscópicos  $S=1.0$ . Os cálculos para as distribuições angulares foram realizados utilizando-se o código FRESCO [29].

Uma vez obtidas, as seções de choque para a distribuição angular tanto para o espalhamento elástico quanto para a reação de transferência foram manualmente introduzidas na plataforma LISE++ (“Physical Models”). Para levarmos em conta outros possíveis contaminantes devemos também incorporar as respectivas seções de choque de produção de cada um deles.

Uma vez com as seções de choque diferencial adicionadas ao LISE++ verificamos o efeito de alguns componentes na maximização do feixe. Primeiramente testamos a influência da abertura do colimador no ponto de cruzamento (2.65 m) utilizando duas aberturas, 5 mm e 10 mm de raio. O foco e envelope (trajetória) para essas duas aberturas não são muito diferentes entre si num intervalo de variação da corrente entre  $I_{\text{SOL}} = 26$  e 28 A. A taxas de produção obtidas para uma abertura maior foi obviamente maior. No entanto a abertura afeta ligeiramente o valor da corrente para o máximo de produção, conforme podemos observar na Figura 4.26.

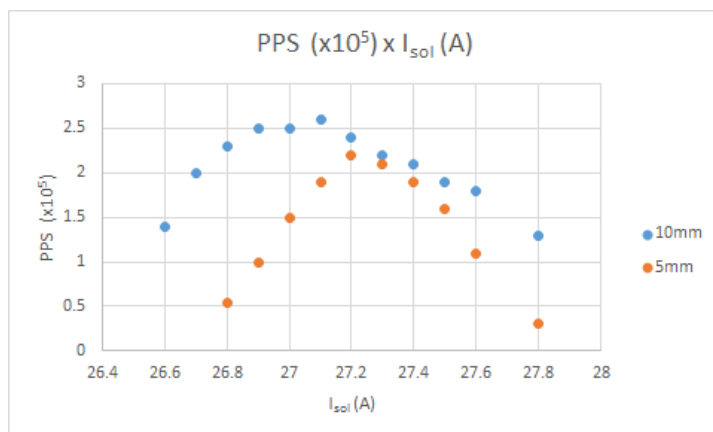


Figura 4.26 - Simulação do Lise++ para a taxa de produção (pps) de  $^{12}\text{B}$  em função da corrente do solenoide considerando uma abertura do colimador no ponto de cruzamento de 5 e 10 mm.

Simulamos também como seria a distribuição em energia das partículas. Essas simulações podem ser vistas nas Figuras 4.27 e 4.28 para a abertura do colimador no ponto de cruzamento com 5 mm e 10 mm de raio, respectivamente. A distribuição em energia obtida para o feixe de  $^{12}\text{B}$  está centrada em  $29.2 \pm 0.4$  MeV. No entanto, notamos uma leve assimetria para energias mais baixas. Essa assimetria pode estar relacionada com a presença de uma certa contribuição do primeiro estado excitado do  $^{12}\text{B}^*$  em 0.953 MeV, que a princípio seria esperado a uma energia de 28.2 MeV. A diferença de energia, 29.2 e 28.2 MeV, para o estado fundamental e primeiro estado excitado, respectivamente, deveria ser suficiente para serem separados pelo sistema de colimadores e bloqueadores. Como essa assimetria está relacionada com partículas de pequeno  $B_p$ , elas poderiam ser cortadas aumentando-se o tamanho do bloqueador Lollipop (GATE-2). Testamos aumentar o tamanho do Lollipop de 17.5 mm para 25 mm e observamos uma melhora na assimetria com uma distribuição centrada em  $29.2 \pm 0.3$  MeV, veja Figura 4.29. No entanto esse aumento do Lollipop causa uma diminuição de um fator dois na intensidade do feixe. Devemos ressaltar que essa assimetria não foi observada experimentalmente e precisa ser melhor investigada nessas nossas simulações. Uma possibilidade que ainda poderemos testar no futuro é a simulação do sistema com a utilização de dois solenoides e um degradador no ponto de cruzamento.

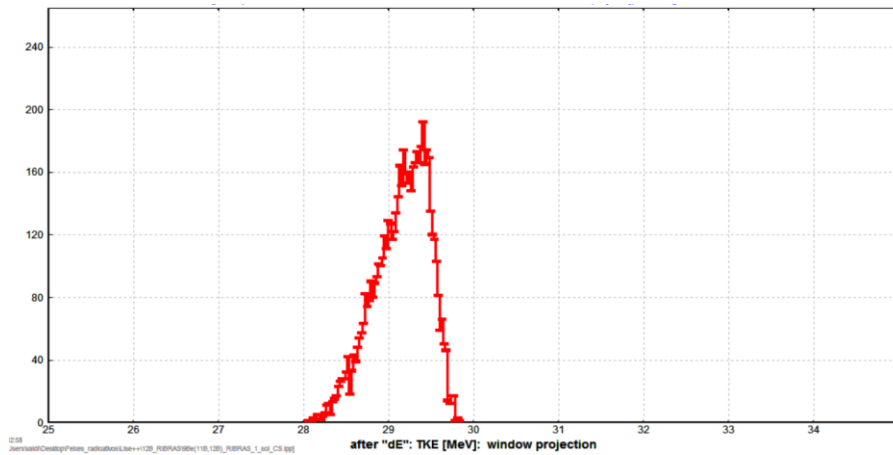


Figura 4.27 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{12}\text{B}$  com colimador do ponto de cruzamento com raio de 5 mm e Lollipop com raio de 17.5 mm.

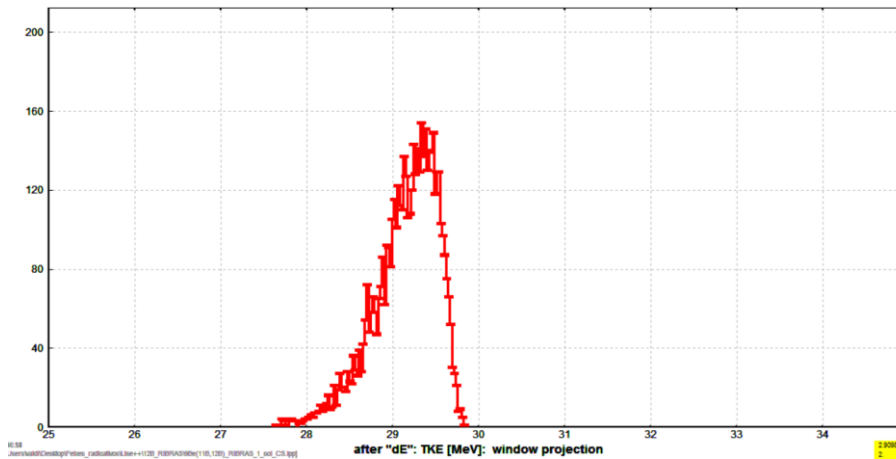


Figura 4.28 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{12}\text{B}$  com colimador do ponto de cruzamento com raio de 10 mm e Lollipop com raio de 17.5 mm.

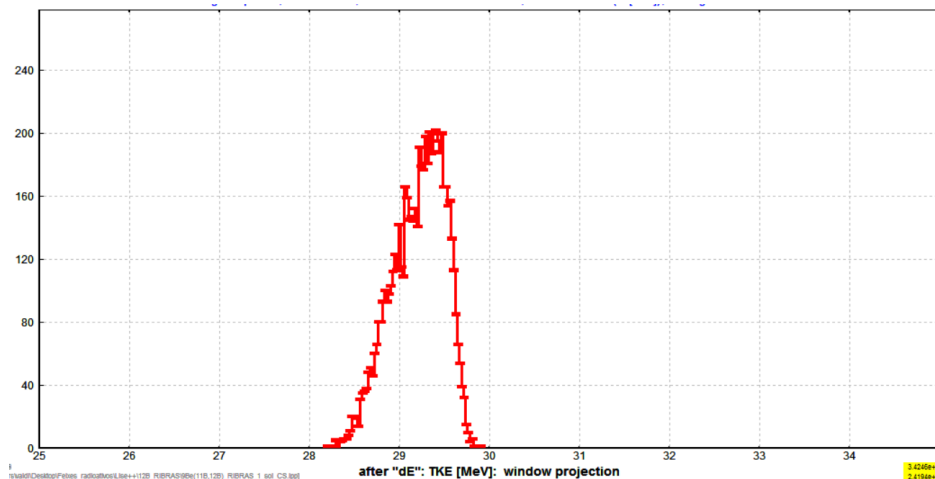


Figura 4.29 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{12}\text{B}$  com colimador do ponto de cruzamento com raio de 5 mm e Lollipop com raio de 25 mm.

## 4.2 Produção de feixes radioativo secundário de $^{14}\text{C}$

A motivação para se produzir feixe radioativo de  $^{14}\text{C}$  é também para que possamos realizar medidas de espalhamento elástico. Essas medidas serão úteis para identificar e estudar a influência de reações de transferência de um ou dois nêutrons no espalhamento elástico e também como base de comparação para medidas com o núcleo halo  $^{15}\text{C}$ , que possui um caroço de  $^{14}\text{C}$  e um nêutron orbitando em sua estrutura. A princípio o  $^{14}\text{C}$ , apesar de radioativo, poderia ser obtido diretamente como um feixe primário uma vez que sua meia vida é longa,  $\tau \sim 5700$  anos. No entanto, isso poderia acarretar em uma contaminação com um elemento de decaimento longo não apenas na fonte de íons, mas também em outros elementos do acelerador, como por exemplo o copo de Faraday. Desta forma, para evitar essa contaminação, seria interessante produzir o feixe de  $^{14}\text{C}$  como um feixe secundário a partir de uma reação de produção no alvo primário. Como nossos planos para o  $^{14}\text{C}$  é utiliza-lo em medidas de espalhamento elástico, nosso interesse maior é na intensidade e não na eliminação de contaminantes.

Seguindo então o roteiro estabelecido para a produção de feixes radioativos temos:

**Etapa-1 (Escolha da reação):** A reação mais conveniente para a produção do feixe radioativo de  $^{14}\text{C}$  seria a reação de transferência de nêutron  $^9\text{Be}(^{13}\text{C}, ^{14}\text{C})^8\text{Be}$  com  $Q=+6.5$  MeV. Outras reações como  $^9\text{Be}(^{18}\text{O}, ^{14}\text{C})^{12}\text{C}$  com  $Q=+4.420$  MeV com transferência de um  $^4\text{He}$  e  $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{14}\text{C})^6\text{Li}$  com  $Q=+2.909$  MeV com transferência de um trítio,  $^3\text{H}$ , são mais complexas e as seções de choque são muito menores do que a transferência de um nêutron. Assim vamos escolher a reação de transferência de nêutrons para a produção do feixe de  $^{14}\text{C}$ .

**Etapa-2 (Energia de interesse):** Já realizamos medidas experimentais com o sistema RIBRAS para a produção do feixe de  $^{14}\text{C}$  com a reação  $^9\text{Be}(^{13}\text{C}, ^{14}\text{C})^8\text{Be}$  [17].

Nessas medidas utilizamos um feixe primário de  $^{13}\text{C}$  com energia  $E(^{13}\text{C}) = 36.5 \text{ MeV}$  incidindo em um alvo sólido de  $^9\text{Be}$  com  $13.2 \mu\text{m}$  de espessura. Considerando as perdas de energia do feixe primário e secundário no alvo de produção e a cinemática da reação, onde o  $^{14}\text{C}$  é emitido entre os ângulos 2 e 6 graus (ângulos de aceitação do solenoide), temos uma energia média calculada para o feixe radioativo de  $^{14}\text{C}$  após o alvo de produção e antes do solenoide de  $E(^{14}\text{C}) = 34.0 \text{ MeV}$ .

**Etapa-3 (Correntes solenoides):** Os cálculos de trajetória para o  $^{14}\text{C}$  com essa energia através de apenas um solenoide e para os ângulos 2, 3, 4, 5 e 6 graus indicaram que a corrente do primeiro solenoide que melhor focaliza o feixe de  $^{14}\text{C}$  foi entre  $I_{\text{SOL}1}=26.0$  e  $26.1 \text{ A}$ , veja Figura 4.30.

Simulation of the beam path through the solenoid:

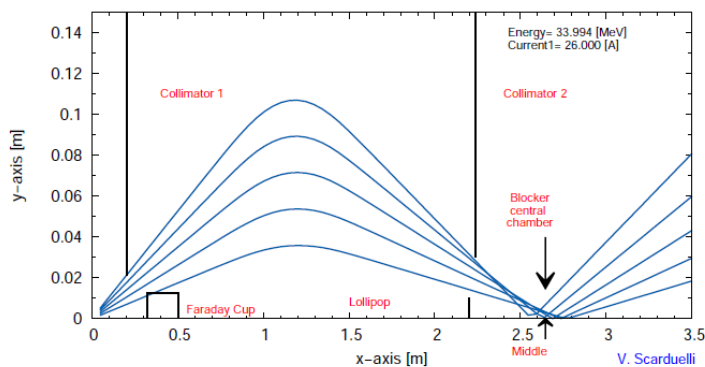


Figura 4.30 - Cálculo de trajetória do feixe radioativo de  $^{14}\text{C}$  para  $I_{\text{sol}} = 26.0 \text{ A}$ .

**Etapa-4 (Possíveis contaminantes):** Com o valor da energia  $E(^{14}\text{C})=34.0 \text{ MeV}$ , da carga e massa do feixe de  $^{14}\text{C}$  calculamos o valor da rigidez magnética  $(B\rho)^2=EA/Q^2=13.2$ . Com essa rigidez magnética estimamos as energias para os possíveis contaminantes que são mostrados na Figura 4.30 num espectro bidimensional  $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$ . Esse espectro calculado deve ser comparado com o espectro obtido experimentalmente e apresentado na Figura 4.31. Como podemos ver os principais contaminantes são as partículas de  $^{13}\text{C}^{4+}$ ,  $^9\text{Be}$  e  $^4\text{He}$ . Observamos experimentalmente que  $I_{\text{SOL}} = 26.0 \text{ A}$  é também a corrente que maximiza a produção de  $^{14}\text{C}$  e também é a corrente que elimina as partículas espalhadas do feixe  $^{13}\text{C}^{+5}$ . Essas partículas espalhadas, portanto, não são observadas no espectro da Figura 4.31.

**Etapa-5 (Intensidade e pureza).** Essa etapa depende das etapas anteriores mas pode ser obtida com cálculos de trajetórias e com simulação utilizando a técnica Monte Carlo, como a ser aplicada com a plataforma LISE++. Como temos medidas experimentais podemos assim validar os resultados da simulação com o LISE++. Podemos com esses dados validar principalmente o uso do raio artificial da bobina do solenoide uma vez que tivemos que alterar esse valor para reproduzir os dados experimentais do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$ .

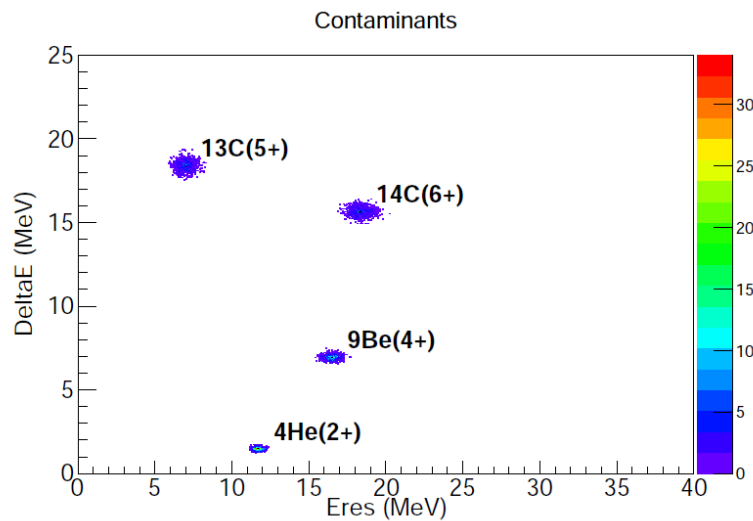


Figura 4.31 - Espectro  $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$  calculado para a produção do feixe radioativo de  $^{12}\text{B}$ . As intensidades são artificiais.

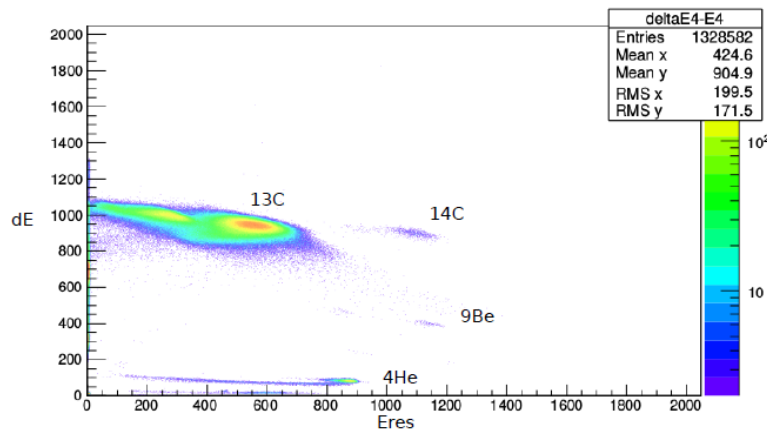


Figura 4.32 - Típico espectro  $\Delta E \times E_{\text{RESIDUAL}}$  obtido durante as medidas da produção do feixe radioativo de  $^{14}\text{C}$ . As partículas do feixe de  $^{14}\text{C}$  e os contaminantes foram espalhados por um alvo de Au e detectados a 20 graus.

O resultado da simulação da trajetória com o LISE++ para o feixe de  $^{14}\text{C}$  utilizando-se apenas um solenoide, com os mesmos parâmetros da Tabela-2 e com a corrente do solenoide  $I_{\text{SOL}}=26.0\text{A}$  pode ser visto na Figura 4.33. Verificamos que a taxa de produção máxima é 1.66 pps para a corrente de  $I_{\text{SOL}}=26\text{ A}$ , completamente de acordo com os dados experimentais. O centroide da distribuição em energia das partículas de  $^{14}\text{C}$  produzidas estava em  $E(^{14}\text{C})=33.3\pm 0.3\text{ MeV}$ . Esse valor está 0.7 MeV abaixo do valor calculado com stopx, como já foi constatado para o feixe de  $^{12}\text{B}$  e se deve aos diferentes métodos de cálculos da perda de energia com o LISE++ e com o stopx. A corrente que focaliza esse feixe com essa energia no ponto de cruzamento obtida dos cálculos de trajetória, com o código de cálculos de trajetória e com o LISE++, é a mesma

Podemos dizer então que os resultados tanto para o  $^{12}\text{B}$  quando para o  $^{14}\text{C}$  validam a simulação com o LISE++.

Vamos agora utilizar o LISE++ para investigar a produção de feixes que ainda não temos medidas experimentais como  $^{10}\text{Be}$  e  $^{15}\text{C}$ .

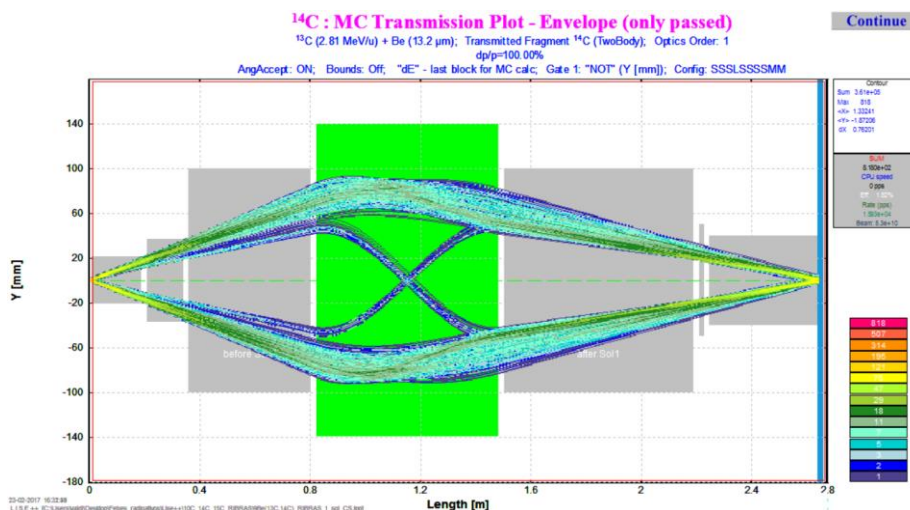


Figura 4.33 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de  $^{14}\text{C}$  pelo sistema RIBRAS para  $I_{\text{SOL}}=26.0\text{ A}$ .

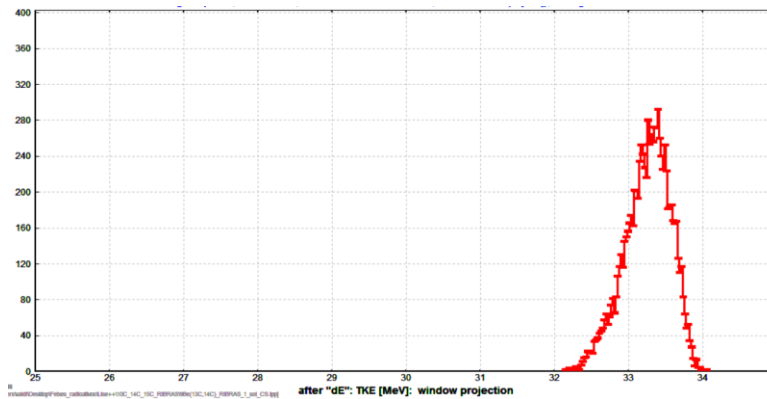


Figura 4.34 - Distribuição da energia cinética das partículas de  $^{14}\text{C}$  produzidas que atravessam o colimador do ponto de cruzamento com  $\pm 5$  mm de abertura. O valor médio é  $33.3 \pm 0.3$  MeV.

### 4.3 Produção de feixe secundário radioativo de $^{10}\text{Be}$

A nossa motivação para produzir o feixe radioativo secundário de  $^{10}\text{Be}$  é para que possamos realizar medidas de espalhamento ressonante em prótons,  $^{10}\text{Be}+p$ , no laboratório Pelletron, utilizando o sistema de duplo solenoide RIBRAS. Reações induzidas por  $^{10}\text{Be}$  em prótons tem interesse para astrofísica nuclear, em particular, para determinar a possível importância do ciclo CNO no universo primordial [30]. Para essas medidas precisamos de um feixe de  $^{10}\text{Be}$  o mais puro possível. A pureza do feixe será nesse caso mais importante que sua intensidade.

Aplicando então o procedimento para a produção de feixe radioativo de  $^{10}\text{Be}$  temos:

**Etapa-1 (Escolha da reação):** As possíveis reações para produção do feixe radioativo de  $^{10}\text{Be}$  são:

- 1)  $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{Be})^{10}\text{B}$  com  $Q=-4.64$  MeV (transferência de próton)
- 2)  $^9\text{Be}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})^8\text{Be}$  com  $Q=+5.15$  MeV (transferência de um nêutron)
- 3)  $^9\text{Be}(^{10}\text{B}, ^{10}\text{Be})^9\text{B}$  com  $Q=-1.62$  MeV (troca de carga)



Essas reações de produção foram selecionadas por envolver troca de poucos nucleons, o que corresponde a uma maior seção de choque comparada com reações de transferência de múltiplos nucleons ou reações de fusão-evaporação, e por possuírem um Q-de-reação não muito negativo ou positivos. As reações 1) e 2), “stripping de próton e pickup de nêutron”, tem seções de choque relativamente altas, da ordem de dezenas de milibarns.

A reação 1) corresponde a uma reação de transferência de prótons. Esse tipo de reação é muito conveniente para se utilizar com o sistema de separação com solenoides. A razão é que as partículas correspondentes ao feixe primário e feixe secundário de interesse tem diferentes números atômicos e conseqüentemente, estados de carga, Q, que são mais facilmente separados pelos solenoides. A rigidez magnética é inversamente proporcional a  $Q^2$ , e diretamente proporcional a massa, A. Isso é válido mesmo que o Q-de-reação seja um pouco negativo, como nosso caso.

A reação 2) é do tipo de transferência de nêutrons,  ${}^9\text{Be}({}^x\text{A}, {}^{x+1}\text{A}){}^8\text{Be}$ . Como já discutido anteriormente, essa reação é muito interessante para produção de feixes radioativos ricos em nêutrons e temos usado na produção de feixes radioativos  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{B}$  e  ${}^{14}\text{C}$ . Conforme também mencionado, o problema principal dessa reação é a presença das partículas de espalhamento elástico como contaminante do feixe de interesse, se o Q-de-reação não for muito alto. Isso porque as partículas  ${}^x\text{A}$  espalhadas e  ${}^{x+1}\text{A}$  da transferência teriam energias muito próximas. Para o nosso caso específico a reação  ${}^9\text{Be}({}^9\text{Be}, {}^{10}\text{Be}){}^8\text{Be}$  tem um  $Q=+5.15$  MeV bastante positivo. Isso possibilitaria uma completa eliminação das partículas espalhadas de  ${}^9\text{Be}$  já no primeiro solenoide.

A reação 3) é do tipo troca de carga, que corresponde a uma transferência sequencial de próton e nêutron. O Q-de-reação não é muito negativo mas essa reação é mais complexa pois envolve uma troca sequencial de próton e nêutron.

Realizamos simulações das taxas de produção para essas reações com o LISE++ utilizando-se apenas o primeiro solenoide com os mesmos parâmetros listados na Tabela-2. Incluímos os resultados de cálculos da distribuição angular com DWBA

para essas reações de transferência utilizando-se o código FRESCO e potenciais de São Paulo para cada sistema envolvido.

### **Etapa-2 (Energia):**

Para a reação de transferência de prótons,  ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, {}^{10}\text{Be})$ , a energia do feixe primário de  ${}^{11}\text{B}$  foi  $E_{\text{LAB}}({}^{11}\text{B})=35$  MeV, antes do alvo de produção, e obtivemos para o  ${}^{10}\text{Be}$  uma energia  $E_{\text{LAB}}({}^{10}\text{Be})=24.4\pm 0.4$  MeV após o alvo. O resultado da simulação para a taxa de contagem pode ser visto na Figura 4.36. A corrente que maximiza o feixe foi  $I_{\text{SOL}}= 28.5$  A.

Para a reação de transferência de nêutrons,  ${}^9\text{Be}({}^9\text{Be}, {}^{10}\text{Be})$ , a energia do feixe primário de  ${}^9\text{Be}$  foi  $E_{\text{LAB}}({}^9\text{Be})=24$  MeV, antes do alvo de produção, e obtivemos para o  ${}^{10}\text{Be}$   $E_{\text{LAB}}({}^{10}\text{Be})=24.1\pm 0.2$  MeV após o alvo. O resultado da simulação para a taxa de contagem pode ser visto na Figura 4.37. A corrente que maximiza o feixe foi  $I_{\text{SOL}}= 28.2$  A.

Para a reação  ${}^9\text{Be}({}^{10}\text{B}, {}^{10}\text{Be})$  a energia do feixe primário de  ${}^{10}\text{B}$  foi  $E_{\text{LAB}}({}^{10}\text{B})=31$  MeV, antes do alvo de produção, e obtivemos para o  ${}^{10}\text{Be}$  uma energia  $E_{\text{LAB}}({}^{10}\text{Be})=24.0\pm 0.4$  MeV após o alvo. O resultado da simulação para a taxa de contagem pode ser visto na Figura 4.38. A corrente que maximiza o feixe foi  $I_{\text{SOL}}= 28.3$  A.

### **Etapa-3 (Correntes solenoides):**

As correntes do solenoide que maximizam as intensidades são  $I_{\text{SOL}}=28.2, 28.5$  e  $28.3$  A, para as reações 1), 2) e 3) respectivamente. Isso é porque as energias geradas para o  ${}^{10}\text{Be}$  são em torno de 24 MeV. Essas correntes são também as que dão o melhor foco. Podemos ver que a taxa de produção da reação para o  ${}^{10}\text{Be}$  utilizando a reação de transferência de nêutrons,  ${}^9\text{Be}({}^9\text{Be}, {}^{10}\text{Be})$ , é mais ou menos duas vezes menor que a taxa utilizando a reação de transferência de prótons  ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, {}^{10}\text{Be})$ . Essa diferença de um fator 2 não é muito significativa em termos de taxa de produção e podemos dizer que são equivalentes. O problema é que normalmente conseguimos feixes primários de  ${}^9\text{Be}$  com intensidades bem menores que para o feixe primário de  ${}^{11}\text{B}$ . Isso faz com que

nossa opção de escolha recaia sobre a reação que maximiza a intensidade, ou seja, a reação de transferência de prótons,  ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, {}^{10}\text{Be})$ . Era de se esperar uma seção de choque menor para a reação de troca de carga,  ${}^9\text{Be}({}^{10}\text{B}, {}^{10}\text{Be})$  comparada com as duas anteriores devido a maior complexidade da reação. No entanto, surpreendentemente os cálculos indicaram uma seção de choque maior. As distribuições angulares para essas reações são mostradas na Figura 4.35 e as produções (pps) simuladas para cada uma das reações estão mostradas nas Figuras 4.36, 4.37 e 4.38.

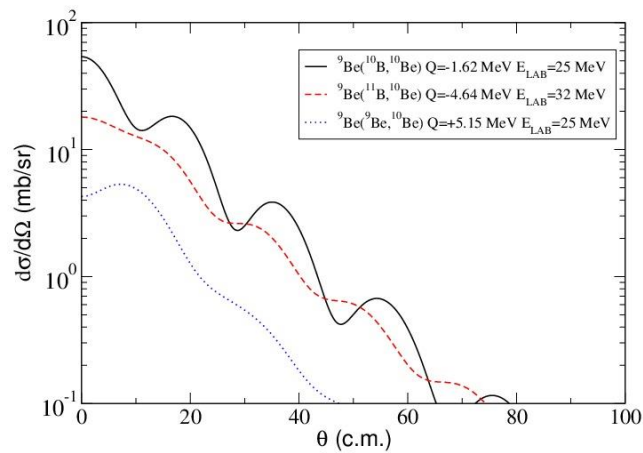


Figura 4.35 – Distribuições angulares calculadas pelo método DWBA para as reações e energias indicadas.

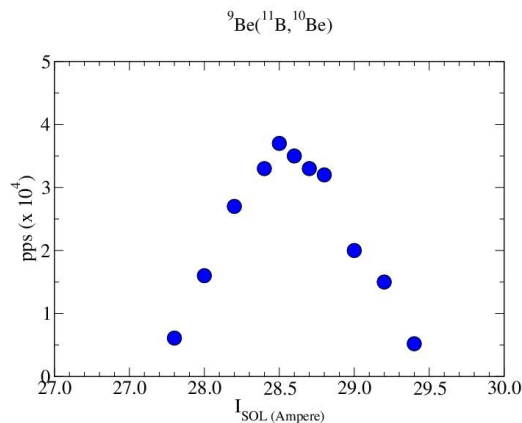


Figura 4.36 - Simulação do LISE++ para a taxa de produção (pps) em função da corrente do solenoide para o feixe de  ${}^{10}\text{Be}$  de 24.4 MeV, após alvo, com a reação  ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, {}^{10}\text{Be})$  e com feixe primário de  ${}^{11}\text{B}$  de 35 MeV antes do alvo e  $1\mu\text{A}$  de intensidade.

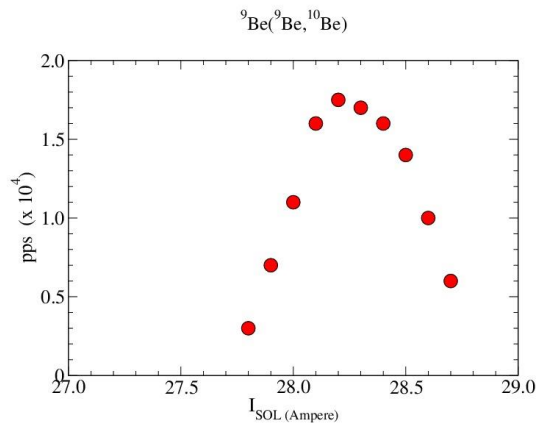


Figura 4.37 - Simulação do LISE++ para a taxa de produção (pps) em função da corrente do solenoide para o feixe de  $^{10}\text{Be}$  de 24.1 MeV, após alvo, com a reação  $^9\text{Be}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})$  e com feixe primário de  $^9\text{B}$  de 24 MeV antes do alvo e  $1\mu\text{A}$  de intensidade.

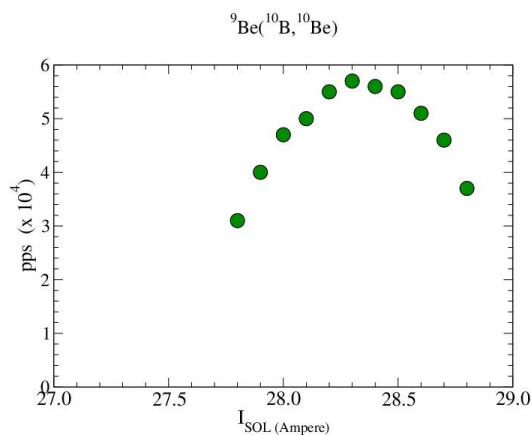


Figura 4.38 - Simulação do LISE++ para a taxa de produção (pps) em função da corrente do solenoide para o feixe de  $^{10}\text{Be}$  de 24.0 MeV, após alvo, com a reação  $^9\text{Be}(^{10}\text{B}, ^{10}\text{Be})$  e com feixe primário de  $^{10}\text{B}$  de 31 MeV antes do alvo e  $1\mu\text{A}$  de intensidade.

As distribuições em energia obtida para o  $^{10}\text{Be}$  para as reações consideradas são simétricas e centradas em  $24.1\pm 0.2$ ,  $24.4\pm 0.4$  e  $24.0\pm 0.4$  MeV, para as reações 1), 2) e 3), respectivamente, conforme podem ser observadas nas Figuras 4.39, 4.40 e 4.41. A distribuição em energia do  $^{10}\text{Be}$  é mais estreita quando utilizamos a reação de transferência de nêutrons, pois corresponde a uma reação com Q positivo e é melhor definida cinematicamente.

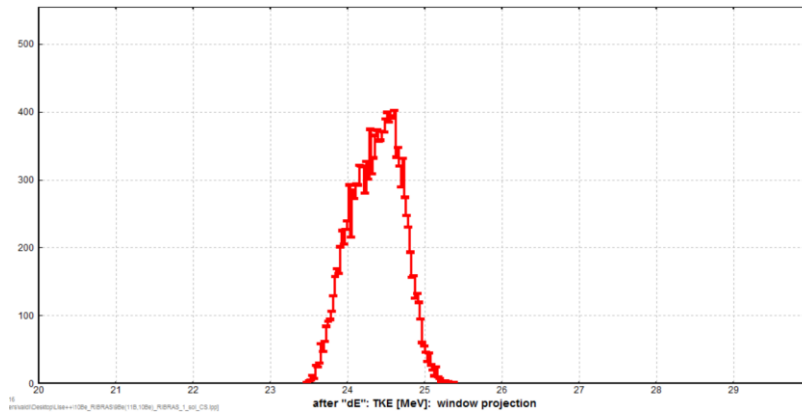


Figura 4.39 – Distribuição de energia obtida pela simulação para o feixe secundário de  $^{10}\text{Be}$  com a reação  $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{Be})$  e uma corrente  $I_{\text{SOL-1}}=28.5\text{ A}$ . O feixe primário de  $^{11}\text{B}$  de 35 MeV antes do alvo. O centroide da distribuição energia para o  $^{10}\text{Be}$  está em  $24.4\pm 0.4\text{ MeV}$ .

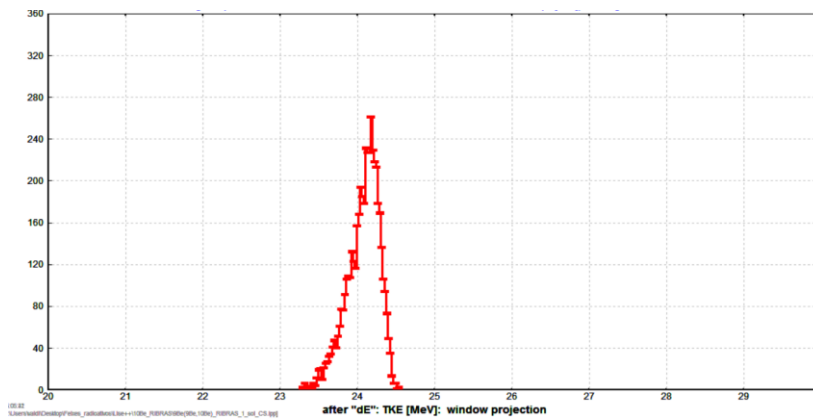


Figura 4.40 – Distribuição de energia obtida pela simulação para o feixe secundário de  $^{10}\text{Be}$  com a reação  $^9\text{Be}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be})$  e uma corrente  $I_{\text{SOL-1}}=28.2\text{ A}$ . O feixe primário de  $^9\text{Be}$  de 24 MeV antes do alvo. O centroide da distribuição energia para o  $^{10}\text{Be}$  está em  $24.1\pm 0.2\text{ MeV}$ .

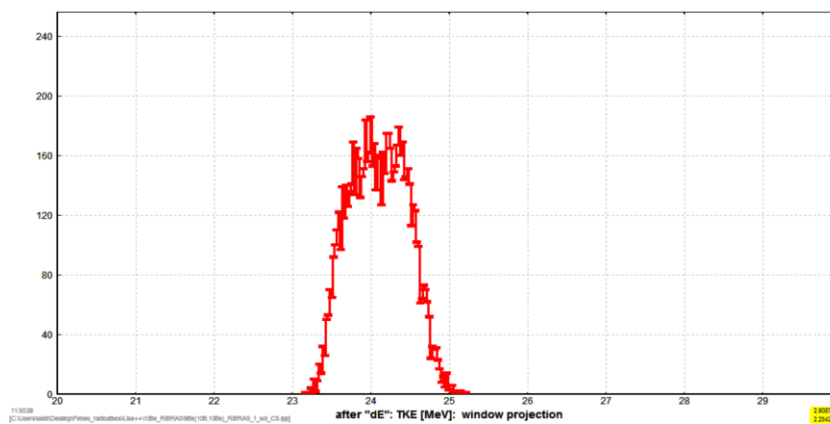


Figura 4.41 – Distribuição de energia obtida pela simulação para o feixe secundário de  $^{10}\text{Be}$  com a reação  $^9\text{Be}(^{10}\text{B}, ^{10}\text{Be})$  e uma corrente  $I_{\text{SOL-1}}=28.3\text{ A}$ . O feixe primário de  $^{10}\text{B}$  de 31 MeV antes do alvo. O centroide da distribuição energia para o  $^{10}\text{Be}$  está em  $24.0\pm 0.4\text{ MeV}$ .

#### Etapa-4 (Contaminantes):

Os principais contaminantes para a produção de feixe de  $^{10}\text{Be}$  são os isótopos de boro ( $^{10}\text{B}$  e  $^{11}\text{B}$ ) e as partículas leves  $^{6,7}\text{Li}$  e  $^4\text{He}$ . Os contaminantes mais difíceis para se eliminar com o sistema de solenoides RIBRAS são partículas de espalhamento elástico. Essa dificuldade aumenta quando temos a reação de produção é transferência de nêutrons quando as partículas do feixe primário e secundário são isótopos. Esse é o caso da reação,  $^9\text{Be}(^9\text{Be},^{10}\text{Be})$ . Assim, optamos por escolher as reações,  $^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{10}\text{Be})$  e  $^9\text{Be}(^{10}\text{B},^{10}\text{Be})$  como reações para produção do feixe de  $^{10}\text{Be}$ . Ambas reações envolvem elementos com  $Z$  diferentes entre o feixe primário e secundário o que facilita a eliminação dos contaminantes.

Para ilustrar como podemos proceder para a eliminação de contaminantes consideramos apenas a reação de transferência de prótons,  $^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{10}\text{Be})$ . Mostramos na Figura 4.42 o resultado da simulação da trajetória para o feixe secundário de interesse  $^{10}\text{Be}$  e a trajetória para os contaminantes do espalhamento elástico  $^{11}\text{B}$ , e um possível contaminante  $^{10}\text{B}$  vindo de uma reação de transferência. Como podemos observar se focalizamos o  $^{10}\text{Be}$ , o contaminante de espalhamento elástico  $^{11}\text{B}$  é focalizado em ponto de rigidez magnética menor e seria completamente eliminado pelo bloqueador Lollipop em 2.2 m. Já o contaminante  $^{10}\text{B}$  também com rigidez magnética muito menor seria eliminado por uma combinação de bloqueador e colimador. Partículas leves tais como  $^{6,7}\text{Li}$  e  $^{4,6}\text{He}$  podem ser eliminadas de uma forma mais complexa. Essas partículas teriam o mesmo valor da rigidez magnética  $(B\rho)^2=EA/Q^2$  que o feixe de interesse. Então podemos elimina-las usando o segundo solenoide e um material degradador no ponto de cruzamento entre os solenoides. Com isso a rigidez magnética do feixe de  $^{10}\text{Be}$  seria mais alterada ao passar pelo degradador do que as partículas mais leves. Ajustando a corrente do segundo solenoide para focalizar o feixe de  $^{10}\text{Be}$ , as partículas leves não seriam focalizadas no mesmo ponto.

**Etapa-5 (Intensidade e pureza).**

Para analisar a inclusão de um degradador no ponto de cruzamento para eliminar partículas mais leves com Zs diferentes que os do feixe de  $^{10}\text{Be}$  de interesse precisamos construir na plataforma LISE++ um sistema com dois solenoides.

Um esquema do sistema com dois solenoides pode ser visto na Figura 4.43. Na Tabela-3 listamos os detalhes dos elementos incluídos. Um degradador de  $^{27}\text{Al}$  com  $5\mu\text{m}$  de espessura foi incluído no ponto de cruzamento entre os dois solenoides.

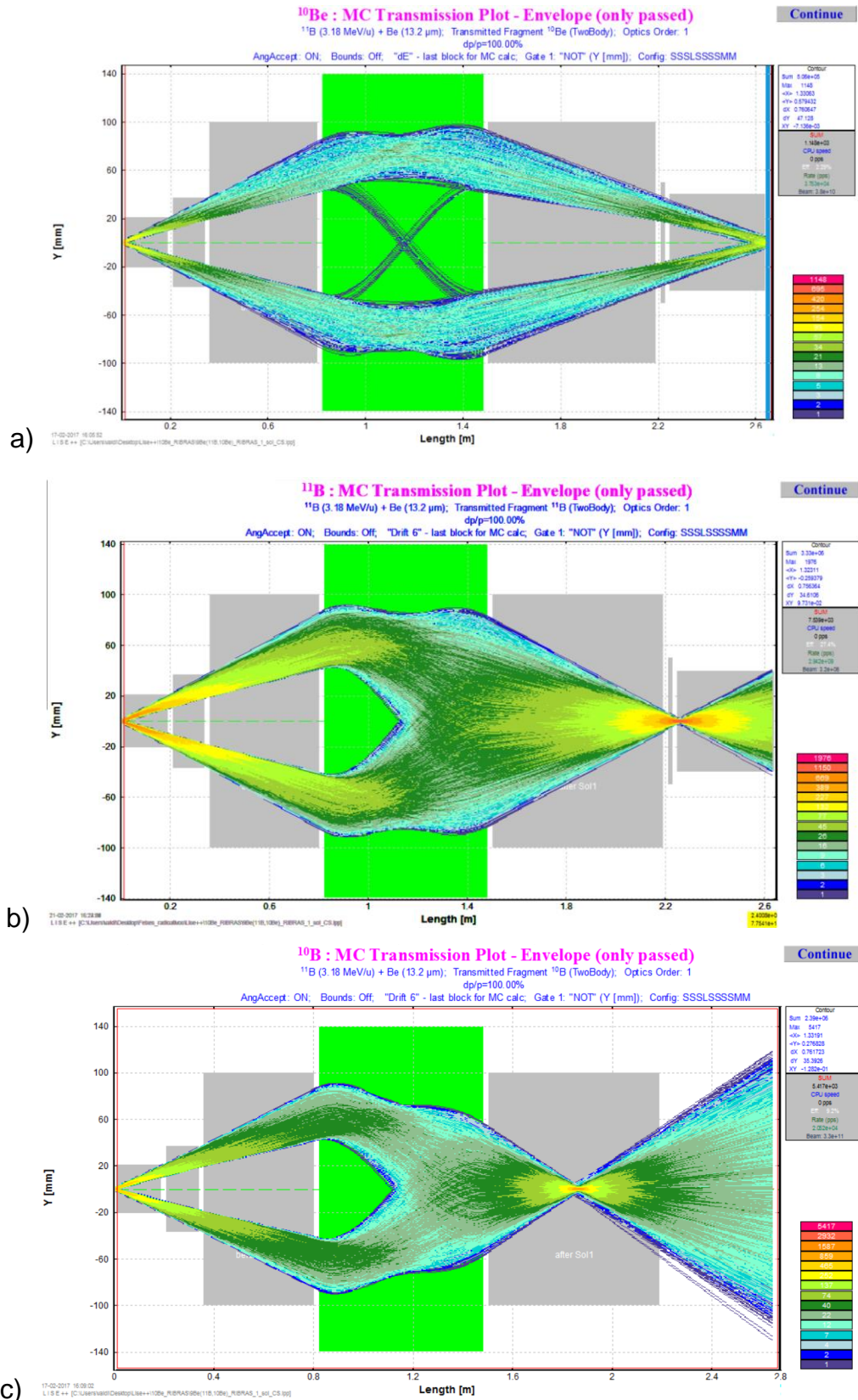


Figura 4.42 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de a) <sup>10</sup>Be, b) <sup>11</sup>B e c) <sup>10</sup>B pelo sistema para corrente  $I_{SOL-1}=28.5$  A.



Tabela-3: Parâmetros dos elementos para simulação Lise++ com o sistema RIBRAS com dois solenoides.

|    | Elemento | Nome          | Espessura (mm)     | Abertura (raio) (mm) | Posição (metros) |
|----|----------|---------------|--------------------|----------------------|------------------|
| 1  | Target   | 9Be           | 13.2 $\mu\text{m}$ |                      | 0.000            |
| 2  | Drift    | Before Slit-1 | 200                | 21                   | 0.200            |
| 3  | Drift    | Before CF     | 150                | 37                   | 0.350            |
| 4  | Drift    | Before Sol-1  | 463                | 100                  | 0.813            |
| 5  | Solenoid | Sol-1         | 680                | 140                  | 1.493            |
| 6  | Drift    | After Sol-1   | 707                | 124                  | 2.200            |
| 7  | Drift    | Drift-5       | 38                 | 50                   | 2.238            |
| 8  | Drift    | Drift-6       | 410                | 40                   | 2.649            |
| 9  | Drift    | Crossover     | 1                  | 5                    | 2.650            |
| 10 | Drift    | Before Sol-2  | 1190               | 100                  | 3.840            |
| 11 | Solenoid | Sol-2         | 680                | 140                  | 4.520            |
| 12 | Drift    | After Sol-2   | 1051               | 127                  | 5.571            |
| 13 | Slit     | Slit-2        | 0                  | 50                   | 5.571            |
| 14 | Drift    | last          | 379                | 100                  | 5.950            |
| 15 | Slit     | Slit-last     | 1                  | 10                   | 5.950            |
| 16 | Material | DE            | 20 $\mu\text{m}$   |                      | 5.950            |
| 17 | Material | TKE           | 500 $\mu\text{m}$  |                      | 5.950            |
| 18 | GATE-1   | Copo Faraday  |                    | $\pm 18.5$           | 0.350            |
| 19 | GATE-2   | Lollipop-1    |                    | $\pm 17.5$           | 2.200            |
| 20 | GATE-3   | Lollipop-2    |                    | $\pm 17.5$           | 5.571            |



Figura 4.43 - Desenho esquemático do sistema RIBRAS simulado na plataforma LISE++. O bloco azul representa o alvo de produção, blocos dourados os solenoides, brancos os colimadores, os blocos de cor rosa são materiais, sendo o primeiro um degradador de  $^{27}\text{Al}$  e os outros dois detectores de Silício.

Uma simulação com o LISE++ considerando a configuração de dois solenoides para a produção do feixe de  $^{10}\text{Be}$  com a reação  $^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{10}\text{Be})$  pode ser vista na Figura 4.44. As correntes que melhor focalizaram o feixe de  $^{10}\text{Be}$ , sem degradador, foram  $I_{\text{SOL-1}}=28.5\text{ A}$  e  $I_{\text{SOL-2}}=24.8\text{ A}$ , respectivamente. Com a inclusão de um degradador de Alumínio ( $^{27}\text{Al}$ ) com  $5.0\ \mu\text{m}$  de espessura no ponto de cruzamento a corrente para o segundo solenoide teve que ser diminuída para  $I_{\text{SOL-2}}=24.0\text{ A}$ , já que a energia do  $^{10}\text{Be}$  também foi um pouco menor devido a presença do degradador de alumínio.

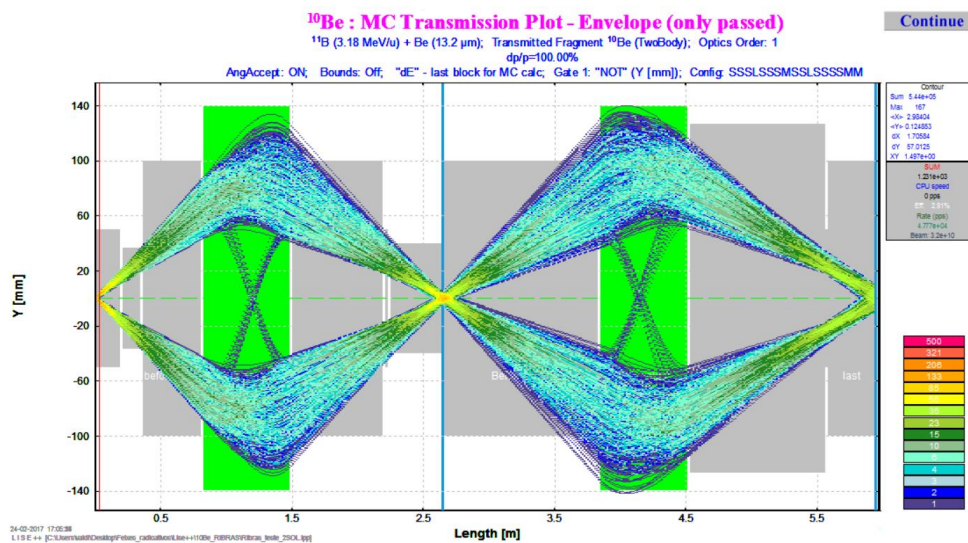


Figura 4.44 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de  $^{10}\text{Be}$  pelo sistema com dois solenoides,  $I_{\text{SOL-1}}=28.5\text{ A}$  e  $I_{\text{SOL-2}}=24.8\text{ A}$  (sem degradador).

Geramos também distribuições em energia para o feixe de  $^{10}\text{Be}$ , com e sem o degradador de alumínio de  $5\ \mu\text{m}$  de espessura, que podem ser vistas nas Figuras 4.45 e 4.46. Os centroides dessas distribuições são  $24.44\pm 0.29$  e  $22.43\pm 0.31$ , respectivamente, ou seja, uma diferença de  $2.0\text{ MeV}$ . O feixe de  $^{10}\text{Be}$  tem uma energia menor ao utilizarmos o degradador de alumínio mas sua distribuição em energia não é afetada de forma significativa. O importante é determinar o quando as partículas de  $^6\text{Li}$  e  $^4\text{He}$  perdem de energia ao atravessarem. O  $^6\text{Li}$  com a mesma rigidez magnética que o  $^{10}\text{Be}$  teria uma energia de  $23\text{ MeV}$  e perderia  $900\text{ keV}$  de energia ao atravessar o degradador, enquanto que o  $^4\text{He}$  teria  $15\text{ MeV}$  de energia e perderia  $400\text{ keV}$ . Ou seja,

a rigidez magnética do feixe de  $^{10}\text{Be}$  passaria de 15.28 para 14.01, a do  $^6\text{Li}$  passaria dos mesmos 15.28 para 14.67 e para o  $^4\text{He}$  de 15.28 para 14.88. Caso essa diferença não seja suficiente para que possamos eliminar esses contaminantes podemos ainda aumentar a espessura do degradador ou utilizar um outro degradador. Podemos concluir que será possível obter um feixe de  $^{10}\text{Be}$  bastante puro. Podemos ainda testar colimadores mais espessos. No entanto essa pureza só poderá ser verificada experimentalmente.

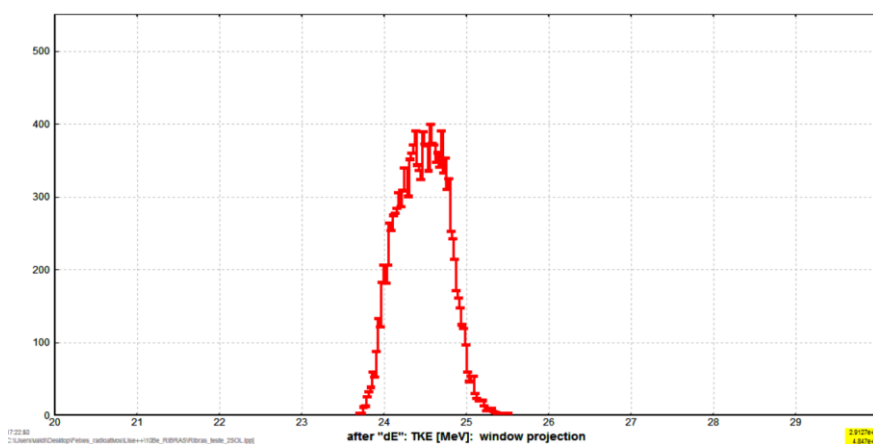


Figura 4.45 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{10}\text{Be}$  com os dois solenoides e sem degradador de alumínio. A distribuição está centrada em  $24.44 \pm 0.29$  MeV.

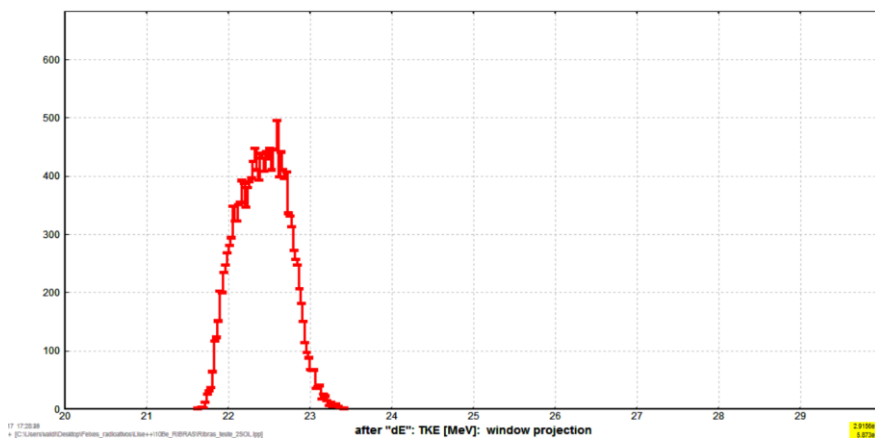


Figura 4.46 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{10}\text{Be}$  com os dois solenoides e com um degradador de alumínio de  $5 \mu\text{m}$  de espessura. A distribuição está centrada em  $22.43 \pm 0.31$  MeV.

### 4.3 Produção de feixe secundário radioativo de $^{15}\text{C}$

A motivação para se produzir o feixe radioativo de  $^{15}\text{C}$  é para realizarmos medidas de espalhamento e fusão com esse núcleo. Esse núcleo é considerado um núcleo halo, e possui um caroço de  $^{14}\text{C}$  e um nêutron orbitando. Essas medidas seriam muito interessantes. Para medidas de espalhamento elástico não precisamos de um feixe muito puro mas sim de um feixe muito intenso. A simulação foi então no sentido de testar a produção desse feixe com a maior intensidade possível e a escolha da reação de produção foi fundamental.

Testamos a produção de um feixe de  $^{15}\text{C}$  com energia após o alvo de produção em torno de 35 MeV. As possíveis reações de produção do feixe radioativo de  $^{15}\text{C}$  consideradas são:

- 1)  $^{18}\text{O}(^{13}\text{C}, ^{15}\text{C})$  com  $Q=+0.69$  MeV (transferência de dois nêutrons).
- 2)  $^9\text{Be}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{C})$  com  $Q=+0.69$  MeV (transferência de um  $^3\text{He}$ ).
- 3)  $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{C})$  com  $Q=-2.79$  MeV (transferência de  $^3\text{He}$ ).

Para reação 1) consideramos um alvo gasoso de  $^{18}\text{O}$  a uma pressão de 760 torr confinado em uma célula de 2.5 cm de comprimento e janelas de Níquel de 2  $\mu\text{m}$  de espessura. O feixe primário de  $^{13}\text{C}$  deve ter uma energia de 48 MeV antes do alvo de produção para obtermos um feixe secundário de  $^{15}\text{C}$  após o alvo em torno de 35 MeV. Considerando as perdas de energia nas folhas da janela e no gás e a cinemática da reação, estimamos uma energia para o feixe radioativo de  $^{15}\text{C}$  de  $E(^{15}\text{C}^{6+})=35.70$  MeV e para as partículas espalhadas de  $^{13}\text{C}$   $E(^{13}\text{C}^{6+})=39.13$  MeV. Essas energias estão relativamente próximas. O principal problema é que as partículas provenientes do espalhamento elástico,  $^{13}\text{C}$ , têm uma energia maior que as partículas de interesse de  $^{15}\text{C}$  e com o mesmo número atômico e estado de carga). Essa é uma situação desfavorável para a separação com o sistema de duplo-solenoides. Partículas do feixe

podem ser espalhadas por outros elementos do sistema ficando com uma energia próxima ao do feixe de interesse. Mesmo que uma porcentagem pequena de partículas do feixe sejam espalhadas em outros elementos essa é suficiente para sobrepujar as partículas do feixe de interesse. Além disso, o feixe de  $^{13}\text{C}$  deve ter uma energia de 48 MeV o que é muito próximo do limite que conseguimos ter com o laboratório Pelletron. Decidimos então não considerar essa reação.

As reações 2) e 3) são muito similares, correspondem a uma transferência de uma partícula de  $^3\text{He}$  em dois alvos diferentes, sendo que a reação 2) leva vantagem por ter um Q-de-reação positivo. Como ambas reações levam a partículas espalhadas e de interesse com números atômicos diferentes, ambas são favoráveis para serem utilizadas em associação com o sistema de duplo-solenoides RIBRAS. A questão fica apenas com relação a taxa de produção. Simulamos as taxas de produção para as reações 2) e 3) considerando um alvo de  $^9\text{Be}$  de 13.2  $\mu\text{m}$  de espessura e um alvo de  $^{13}\text{C}$  com 0.5  $\text{mg}/\text{cm}^2$ , respectivamente, e apenas o primeiro solenoide. Para essas simulações abrimos um pouco mais o colimador no ponto de cruzamento de 5 mm de raio para 10 mm para aumentarmos um pouco mais a taxa de produção.

As simulações para as taxas de produção para ambas reações 2) e 3) podem ser vistas nas Figuras 4.47 e 4.48. Utilizamos seções de choque calculadas para essas reações e obtivemos taxas de produções baixíssimas. Essas taxas de reações inviabilizam a utilização desse feixe para medidas de espalhamento elástico mas podem ser utilizados para outras reações e medidas que não exijam altas taxas de contagem.

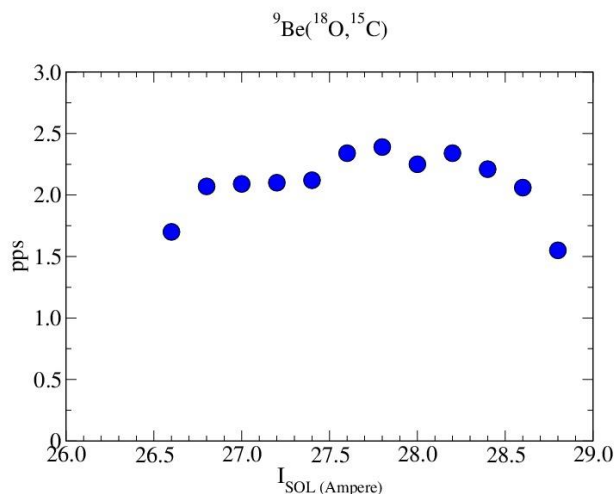


Figura 4.47 - Simulação do LISE++ para a taxa de produção (pps) em função da corrente do solenoide para o feixe de  ${}^{15}\text{C}$  de 35.0 MeV, após alvo, com a reação  ${}^9\text{Be}({}^{18}\text{O}, {}^{15}\text{C})$  e com feixe primário de  ${}^{18}\text{O}$  de 47 MeV antes do alvo e  $1\mu\text{A}$  de intensidade.

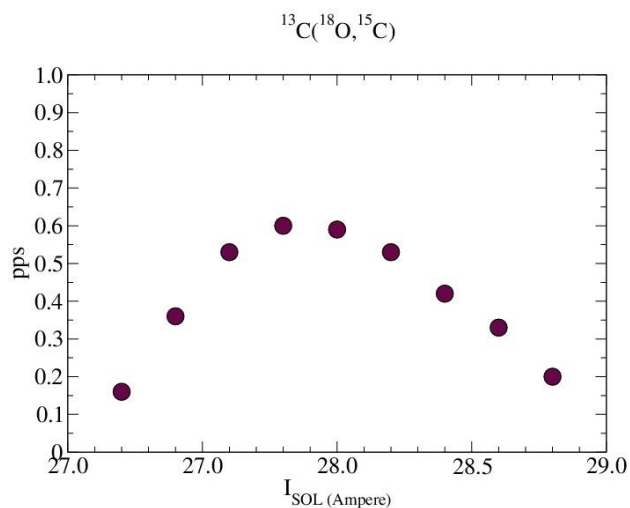


Figura 4.48 - Simulação do LISE++ para a taxa de produção (pps) em função da corrente do solenoide para o feixe de  ${}^{15}\text{C}$  de 35.0 MeV, após alvo, com a reação  ${}^9\text{Be}({}^{18}\text{O}, {}^{15}\text{C})$  e com feixe primário de  ${}^{18}\text{O}$  de 47 MeV antes do alvo e  $1\mu\text{A}$  de intensidade.

A simulação com o LISE++ da trajetória para um feixe de  $^{15}\text{C}$  obtido através da reação  $^9\text{Be}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{C})$  com um feixe primário de  $^{18}\text{O}$  de 47 MeV pode ser visto na Figura 4.49. A corrente que melhor focaliza esse feixe é  $I_{\text{SOL}}=27.8$  A. A distribuição de energia obtida pode ser vista na Figura 4.50. Como podemos ver a distribuição em energia é bem mais larga do que as obtidas pelos feixes anteriores e a energia média obtida foi  $E(^{15}\text{C})= 35.0\pm 1.0$  MeV.

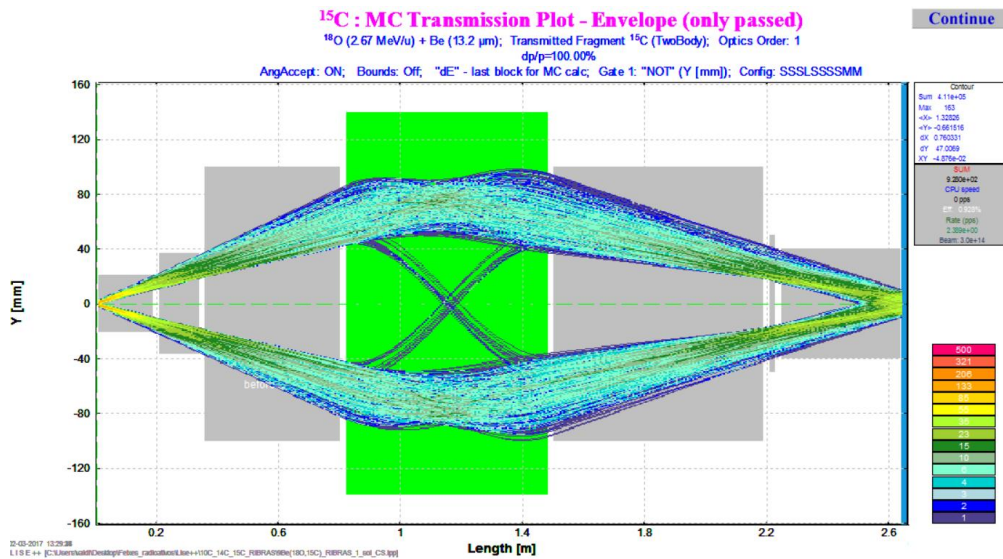


Figura 4.49 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de  $^{15}\text{C}$  pelo sistema para  $I_{\text{SOL-1}}=28.2$  A. A reação utilizada foi  $^9\text{Be}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{C})$  com um feixe de  $^{18}\text{O}$  de 48 MeV.

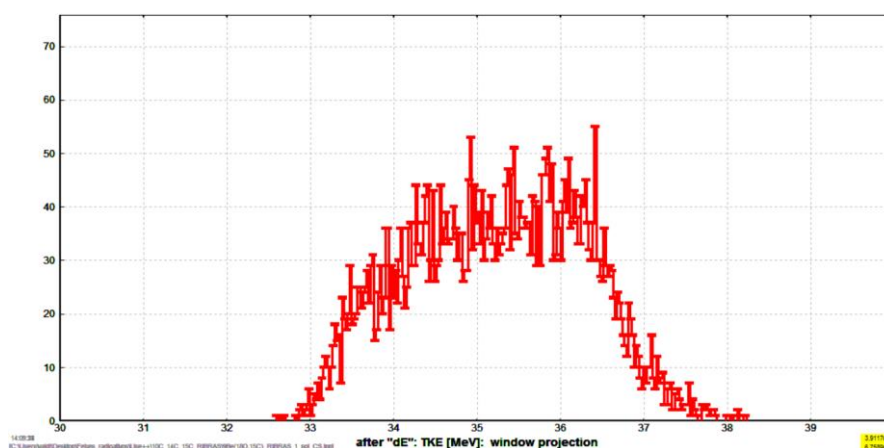


Figura 4.50 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{15}\text{C}$  com colimador do ponto de cruzamento com 10 mm de raio e Lollipop com raio de 17.5 mm. A reação utilizada foi  $^9\text{Be}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{C})$  com um feixe de  $^{18}\text{O}$  de 47 MeV. A energia média obtida foi  $35.0\pm 1.0$  MeV.

A simulação da trajetória para um feixe de  $^{15}\text{C}$  obtido através da reação  $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{C})$  com um feixe primário de  $^{18}\text{O}$  de 42 MeV pode ser visto na Figura 4.51. A corrente que melhor focaliza esse feixe é  $I_{\text{SOL}}=28.0$  A. A distribuição de energia obtida pode ser vista na Figura 4.52. A distribuição em energia é utilizando-se essa reação com alvo de  $^{13}\text{C}$  é bem mais estreita que a anterior sendo a energia média obtida  $E(^{15}\text{C})= 35.6\pm 0.5$  MeV.

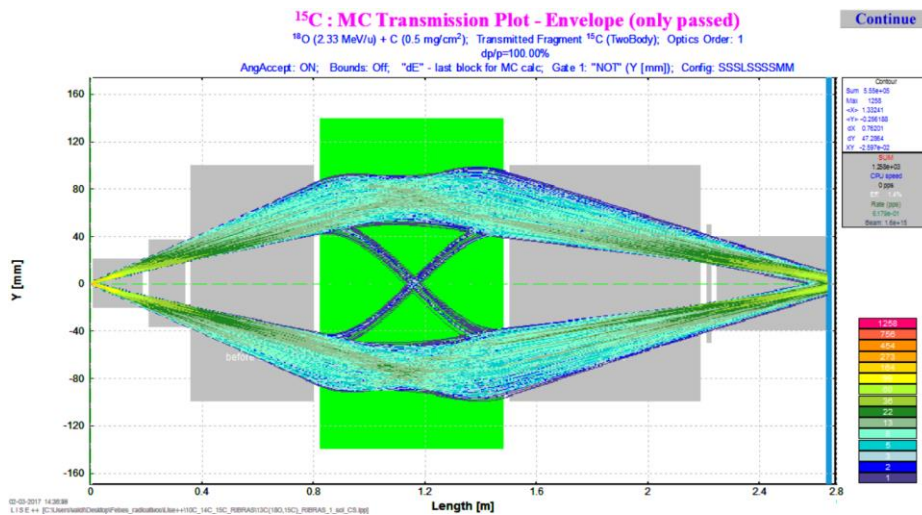


Figura 4.51 - Simulação da passagem (envelope) do feixe radioativo de  $^{15}\text{C}$  pelo sistema para  $I_{\text{SOL-1}}=28.0$  A. A reação utilizada foi  $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{C})$  com um feixe de  $^{18}\text{O}$  de 42 MeV.

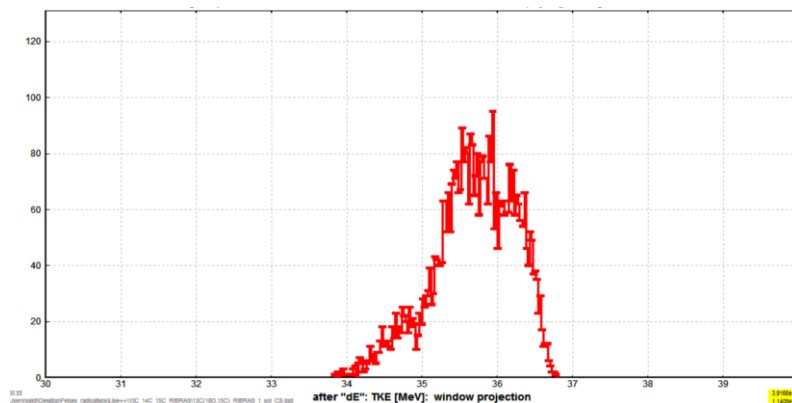


Figura 4.52 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{15}\text{C}$  com colimador do ponto de cruzamento com 10 mm de raio e Lollipop com raio 17.5 mm. A reação utilizada foi  $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{C})$  com um feixe de  $^{18}\text{O}$  de 42 MeV. A energia média obtida foi  $35.6\pm 0.5$  MeV.

Obtivemos uma melhor resolução em energia para o feixe de  $^{15}\text{C}$  utilizando-se a reação  $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{C})$ . Isso é devido ao fato de termos utilizado uma espessura de 0.5  $\text{mg}/\text{cm}^2$  para o alvo de  $^{13}\text{C}$ , o que corresponde a uma espessura em torno de 2  $\mu\text{m}$ . Essa



espessura é bem menor do que 13.2  $\mu\text{m}$  do alvo de  $^9\text{Be}$  mas é a espessura máxima que esperamos conseguir para esse alvo.

As distribuições em energia para ambas reações apresentam uma assimetria na região de baixas energias que deve corresponder ao primeiro estado excitado do  $^{15}\text{C}$  em 0.740 MeV. Essa é uma situação parecida a do feixe de  $^{12}\text{B}$ . Para eliminar essa contribuição do estado excitado, que corresponde a parte da distribuição com menor  $B_p$ , precisamos aumentar o tamanho do Lollipop. O efeito do aumento do raio do Lollipop de 17.5 mm para 30.0 mm pode ser visto na Figura 4.53. A distribuição é um pouco mais simétrica. No entanto, para eliminarmos um pouco mais essa componente devemos aumentar ainda mais o tamanho do Lollipop. Por outro lado o aumento do raio do Lollipop acarreta também em uma diminuição da taxa de contagem.

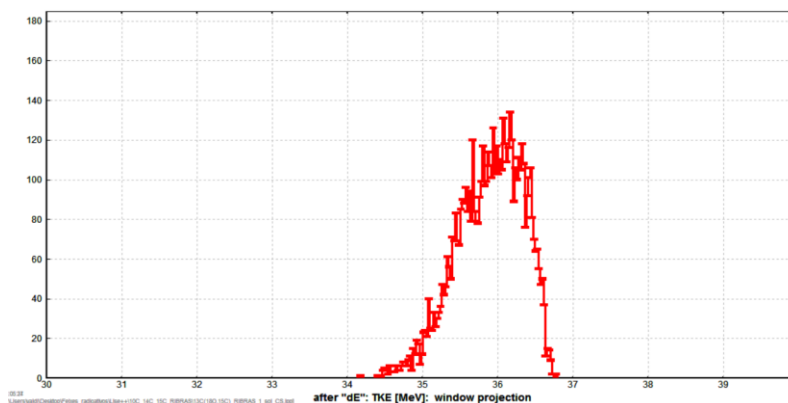


Figura 4.53 - Simulação da energia cinética das partículas de  $^{15}\text{C}$  com colimador do ponto de cruzamento com 10 mm de raio e Lollipop com raio de 30 mm. A reação utilizada foi  $^{13}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{C})$  com um feixe de  $^{18}\text{O}$  de 42 MeV. A energia média obtida foi  $35.9 \pm 0.4$  MeV.

Podemos concluir que a produção do feixe de  $^{15}\text{C}$  com o RIBRAS vai ser difícil e com uma baixíssima intensidade. Feixe de  $^{15}\text{C}$  foi obtido no laboratório Argonne com uma boa intensidade através da reação  $^2\text{H}(^{14}\text{C}, ^{15}\text{C})$  [31,32]. Essa reação induzida por feixe primário de  $^{14}\text{C}$  é a melhor reação para produção desse feixe. A dificuldade é conseguir material de  $^{14}\text{C}$  enriquecido.

# 5

## Conclusão

Neste trabalho abordamos a produção de alguns desses feixes na região de massa  $A=10$  e  $15$ , especificamente,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{12}\text{B}$ ,  $^{14}\text{C}$  e  $^{15}\text{C}$ . Descrevemos métodos de produção e aplicamos simulações para estudarmos as peculiaridades na produção cada um deles com o intuito de produzir feixes o mais intenso e puros possíveis. Nesse trabalho utilizamos a plataforma LISE++ para realizar as simulações de produção de feixes radioativos onde a geração de eventos é dada pelo método de Monte Carlo. Construímos um sistema separador virtual na plataforma com parâmetros de um sistema real de duplo-solenoides, RIBRAS. As simulações obtidas foram então comparadas com resultados experimentais para os feixes de  $^{12}\text{B}$  e  $^{14}\text{C}$ , onde um bom acordo foi obtido. Esse bom acordo valida as geometrias e parâmetros utilizados nessa plataforma.

Uma vez validada utilizamos esta plataforma Lise++ para realizar simulações e escolher reações de produção e alternativas de purificação para os feixes radioativos de  $^{10}\text{Be}$  e  $^{15}\text{C}$ . Para o  $^{10}\text{Be}$  uma boa pureza era necessário enquanto que para o  $^{15}\text{C}$  priorizamos a intensidade. Fizemos um extensivo estudo da produção do feixe de  $^{10}\text{Be}$  com essas simulações. Como ainda não temos incorporado na plataforma cálculos de reações de transferência, tivemos que realizar separadamente cálculos de distribuições angulares com método de DWBA, utilizando o código FRESCO e potenciais de SP. Esperamos que num futuro esse mecanismo de reação seja incorporado na plataforma LISE++. Para a produção do feixe de  $^{10}\text{Be}$  todas as reações escolhidas se mostraram adequadas, sendo que a mais interessante corresponde a transferência de um próton,

$^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{10}\text{Be})$ . Infelizmente as possíveis reações para produção do feixe radioativo de  $^{15}\text{C}$  não se mostraram muito promissoras. As seções de choque obtidas de cálculos foram muito pequenas, gerando uma taxa de produção muito baixa, o que inviabiliza a produção desse feixe para medidas de espalhamento elástico ou fusão. A alternativa seria utilizar feixes primários isotopicamente enriquecido de  $^{14}\text{C}$  em associação com a reação de produção  $^9\text{Be}(^{14}\text{C},^{15}\text{C})$  ou  $^2\text{H}(^{14}\text{C},^{15}\text{C})$ . No entanto, esse material é muito difícil de ser adquirido e podemos ainda contaminar o acelerador Pelletron com um elemento de vida-média muito longa.

Em conclusão podemos dizer que a plataforma LISE++ se mostrou bastante útil para estudarmos as reações de produção de feixes radioativos. Pretendemos agora explorar ainda mais essa plataforma criando configurações mais complexas e aplicando-a para situações mais elaboradas.

## Referências Bibliográficas

- [1] Isao Tanihata, Herve Savajols, and Rituparna Kanungo. Recent experimental progress in nuclear halo structure studies. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 68:215 – 313, 2013. ISSN 0146-6410. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j>.
- [2] P. Egelhof, *Progress in Particle and Nuclear Phys.* 46, 307-318 (2001).
- [3] I. Tanihata. Neutron halo nuclei. *J. Phys. Nucl. Part. Phys.* 22, 157-198 (1996).
- [4] K. Gulyuz *et al.* High Precision Determination of the  $\beta$  Decay QEC Value of  $^{11}\text{C}$  and Implications on the Tests of the Standard Model. *Phys. Rev. Lett.* **116**, 012501 (2016). doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.012501
- [5] Medical application of radioactive nuclear beams at HIMAC, A. Kitagawa, Y. Furusawa, T. Kanai, M. Kanazawa, H. Mizuno *et al.*, *Review of Scientific Instruments* 77, 03C105 (2006). [dx.doi.org/10.1063/1.2149309](http://dx.doi.org/10.1063/1.2149309).
- [6] GANIL website. URL [www.ganil-spiral2.eu/spiral2](http://www.ganil-spiral2.eu/spiral2)
- [7] GSI accelerator. URL [http://www.gsi.de/portrait/fair\\_e.html](http://www.gsi.de/portrait/fair_e.html)
- [8] CERN's ISOLDE. URL: <http://isolde.web.cern.ch/ISOLDE/>
- [9] National Superconducting Cyclotron Laboratory. URL [www.nscl.msu.edu/](http://www.nscl.msu.edu/)
- [10] RIKEN website. URL [www.riken.jp/enqn/r-world/research/lab/wako/atomic/index.html](http://www.riken.jp/enqn/r-world/research/lab/wako/atomic/index.html)
- [11] F. Becchetti, M. Y. Lee, T W. O'Donnell, D. A. Roberts, J. J. Kolata, L. O. Lamn, G. Rogachev, V. Guimarães, P. A. DeYoung and S. Vicent. *Nucl. Inst.. Meth. A* 505, 377 (2003).
- [12] ISAC Facilities for Rare-Isotope Beams. URL [www.triumf.ca/research/research-facilities/isac-facilities-for-rare-isotope-beams](http://www.triumf.ca/research/research-facilities/isac-facilities-for-rare-isotope-beams)
- [13] R. Lichtenthaler, A. Lepine-Szily, V. Guimarães, *et al.* *Eur. Phys. Jour. A* 25, 733 (2005).
- [14] A. Lepine-Szily, R. Lichtenthaler V. Guimarães. *Eur. Phys. Jour. A* 50, 128 (2014).
- [15] J. J. Kolata, V. Guimarães, E. F. Aguilera. *Eur. Phys. Jour. A* 52, 123 (2016).

- [16] W. R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particles Physics Experiments*, Springer-Verag, (1994).
- [17] Efeitos de deformação e cluster no estudo do espalhamento elástico dos núcleos  $^{10}\text{B}$  e  $^{10}\text{C}$  em alvo de  $^{58}\text{Ni}$ . Tese de Doutorado. Valdir Scarduelli, (2016).
- [18] W. T. Milner. Programas do upak, Oak Ridge National Laboratory. (1987).
- [19] J. F. Ziegler, *et al.*, *The Stopping and Range of Ions in Solids*, Pergamon Press, New York (1985)
- [20] Mu Young Lee. TWINSOL: A DUAL SUPERCONDUCTING SOLENOID ION-OPTICAL SYSTEM FOR THE PRODUCTION AND STUDY OF LOW-ENERGY RADIOACTIVE NUCLEAR BEAM REACTIONS. Tese de doutorado, University of Notre Dame, Estados Unidos, (1999).
- [21] Plataforma LISE++, [lise.nscl.msu.edu](http://lise.nscl.msu.edu), O. B. Tarasov e D. Bazin, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266, 19–20, October 2008, Pages 4657–4664, LISE++: Radioactive beam production with in-flight separators, *Nuclear Instruments and methods B 266*, 4657 (2008).[dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2008.05.110](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.05.110).
- [22] R. Anne, *et al.* *Nucl. Instr. and Meth. A*, 257, p. 25 (1987).
- [23] L. C. Northcliffe, *et al.* *Nucl. Dat. Tabl. A*, 7, 233 (1970).
- [25] N. Deshmukh, V. Guimarães, *et al.*, *Phys. Rev. C* 92, 054615 (2015).
- [26] E. F. Aguilera, *et al.*, *Phys. Rev. C* 79, R021601 (2009).
- [27] Toward a global description of the nucleus-nucleus interaction. L. C. Chamon, B. V. Carlson, L. R. Gasques, D. Pereira, C. De Conti, M. A. G. Alvarez, M. S. Hussein, M. A. Candido Ribeiro, E. S. Rossi, Jr., and C. P. Silva, *Phys. Rev. C* 66, 014610 (2002).
- [28] *Methods of Direct Reaction Theories*, I. J. Thompson, in *Scattering*, E.R. Pike and P.C. Sabatier (eds), Academic Press (2001) 1360-1372 (2001).
- [29] Coupled channels methods for nuclear physics., I. J. Thompson, *Computer Phys. Rep.*, Vol. 7 pages 167-212 (1988).
- [30] A. Coc *et al.*, *The Astrophys. Journ.* **744**, 158 (2012).

[31] P. F. F. Carnelli, S. Almaraz-Calderon, K. E. Rehm, et al. *Measurements of Fusion Reactions of Low-Intensity Radioactive Carbon Beams on  $^{12}\text{C}$  and their Implications for the Understanding of X-Ray Bursts*, Phys.Rev.Lett. 112, 192701 (2014), doi: 10.1103/PhysRevLett.112.192701

[32] M. Alcorta, K. E. Rehm, B. B. Back, et al, *Fusion Reactions with the One-Neutron Halo Nucleus  $^{15}\text{C}$* , Phys. Rev. Lett. 106, 172701 (2011), doi: 10.1103/PhysRevLett.106.172701