

ANEXO I

PROJETO DE BOLSA DE ESTUDOS AVANÇADOS – BEA

TÍTULO DO PROJETO: IMPLEMENTAÇÃO DA LINHA 3 DO CV-28 COM CÂMARA DE ESPALHAMENTO E FEIXE EXTERNO PARA A ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.

DURAÇÃO: 24 MESES

Coordenador do Projeto: JULIO CEZAR SUITA

Supervisor da Bolsa: PAULO ALBERTO LIMA DA CRUZ

INTRODUÇÃO

Desde sua instalação no IEN (Instituto de Engenharia Nuclear) em 1974, o CV-28 (acelerador do tipo cíclotron, fabricado pela *The Cyclotron Co.*) teve suas atividades dedicadas, na maior parte do tempo, à produção de radiofármacos para uso em medicina nuclear. O CV-28 tem capacidade de acelerar quatro tipos de partículas, as quais são produzidas a partir de gases. Na Tab. 1 são apresentados os gases utilizados e as respectivas partículas ou íons que são produzidas, como também as energias máximas para cada um deles.

Gás	Partícula	Energia Máxima (MeV)
Hidrogênio	Próton (p)	24
Deutério	Dêuteron (d)	14
Helio 3	Helion ($^3\text{He}^{++}$)	36
Helio 4	Alfa(α)	28

Tabela 1: Partículas produzidas pelo Cíclotron CV-28 do IEN-CNEN/RJ.

O CV-28 esteve otimizado para operar com prótons com energia máxima de 24 MeV e correntes entre 10 μ A e 30 μ A devido a alta demanda na produção de radiofármacos, que eram produzidos rotineiramente (^{123}I , ^{18}F e MIBG). A partir de 2022, a produção de radiofármacos não será uma exclusividade em suas atividades, podendo assim modificar os parâmetros operacionais da máquina. Deste modo, torna-se possível sua aplicação em pesquisa atendendo à demanda de pesquisadores por outros tipos de feixes.

Cada vez mais, laboratórios que possuem aceleradores do tipo cíclotron têm adicionado às suas instalações, linhas dedicadas à análise de materiais [1-6]. Com o intuito de expandir as possibilidades de pesquisa no CV-28, neste projeto propõe-se a instalação de uma linha de feixe na Caverna 3, esta possibilitará experimentos de física nuclear e caracterização de materiais por meio de técnicas analíticas nucleares.

A análise de materiais por feixes iônicos há décadas vem sendo utilizada devido ao seu caráter multi-elementar, não destrutivo, quantitativo e de rápida resposta, além de ser aplicável a uma gama muito grande de tipos de materiais. As respostas dessas análises são sempre de caráter composicional e muitas vezes é possível ainda, a depender da técnica, obter perfis elementares em profundidade[7-10].

Além de uma câmara de espalhamento, a linha contará com uma estação de feixe externo. As características do feixe como sua alta energia e intensidade, pode ser compreendida como uma facilidade na extração do feixe em ambiente atmosférico. Uma das maiores vantagens de uma linha de feixe externo é aumentar a gama de amostras possíveis de serem analisadas, incluindo assim, aquelas que não podem ser colocadas em vácuo devido suas características químicas: líquidos, materiais altamente porosos, tecido orgânico; ou físicas: objetos do bem cultural, dispositivos eletrônicos, etc[11-13]. Até o momento no estado do Rio de Janeiro não há linhas de feixe externo, o que torna esse projeto relevante na área de física nuclear. Além disso, o estado do RJ é o terceiro estado em número de museus e possui poucos grupos com formação em física, dedicados ao estudo e salvaguarda do patrimônio cultural.

Neste cenário, a implementação de técnicas nucleares analíticas em ar, no CV-28, possibilitará a inclusão do IEN-CNEN na vanguarda de estudos relacionados à caracterização de materiais por métodos não destrutivos.

Metodologia de pesquisa

O limite inferior de detecção da técnica PIXE (*Particle Induced X-Ray Emission*) é determinado pela janela de entrada do detector (geralmente corresponde ao flúor) e o limite superior é função da seção de choque de ionização da camada K de átomos pesados. A probabilidade de que ocorra uma ionização (seção de choque de ionização, s_i) é máxima quando a velocidade do próton coincide com a velocidade do elétron em sua órbita. Para camadas mais internas (K e L) envolvidas na produção de raios X característicos, essa velocidade é cerca de 10% da velocidade da luz, c , sendo este fato que determina os parâmetros ótimos da técnica PIXE, energia e massa do íon do feixe. Assim, para um próton ganhar uma velocidade $0,1c$ ele deve ter uma energia em torno de 3 MeV [14]. Com isso é necessário reduzir a energia do feixe de prótons do CV-28 de 24 MeV para 3MeV; conseqüentemente, um degradador de energia é necessário para obter esta redução. Segundo um estudo feito para implementação das técnicas NRA e PIXE no CRC ciclotron [15], as melhores condições de degradação de feixe foram obtidas com uma folha de carbono para uma energia inferior, 13 MeV. Este estudo leva em conta a qualidade do feixe em termos de dispersão em energia e produção de nêutrons. Seguindo este estudo, uma simulação prévia da degradação do feixe pode ser vista na Fig.1. Esta simulação foi feita no programa SRIM[16] para um feixe de prótons de 24MeV depois de passar por uma folha de carbono de 2.8mm e 10mm de ar.

A energia média do feixe no alvo seria em torno de 3.10(83) MeV. A simulação mostra uma alta dispersão em energia, e straggling angular.

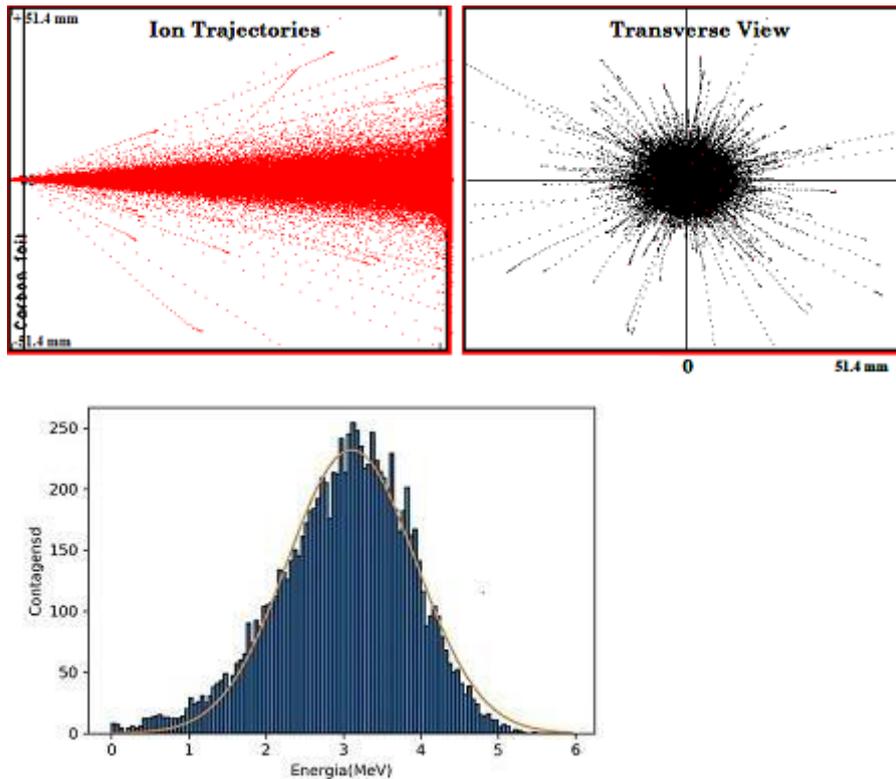


Figura 1: Simulação de degradação de feixe de prótons de 24MeV para 3MeV. a) trajetória do feixe; b) visão transversal do feixe; gráfico da dispersão do feixe.

A técnica RBS (*Rutherford Backscattering Spectroscopy*) também trabalha com energias de poucos MeV's, no mesmo range das energias utilizadas para a técnica PIXE e pode ser implementada para feixes de prótons e alfas. É uma técnica analítica que permite não só obter concentrações elementares como também permite estabelecer um perfil elementar em profundidade. Outra técnica que possibilita a análise de materiais que será implementada é a PIGE (*Particle Induced Gamma Emission*). Com esta técnica é possível obter teores de isótopos, mas para isso o controle fino da energia é um fator primordial, pois para a detecção isotópica é necessário acessar energias de ressonâncias específicas para cada material analisado. A implementação dessas técnicas requer tipos de detectores diferentes, SDD (Silicon Drift Detector), detectores de barreira de superfície (Silicon Detectors) e HPGe (High Purity Germanium Radiation Detectors).

Linha 3

A linha conta com uma infraestrutura pré existente que consiste em:

- Quadrupolos
- Câmara de espalhamento com porta alvos (torre de alvos), que permite o movimento do alvo na vertical e angular (em torno do seu próprio eixo).
- Passadores BNC
- Copo de Faraday
- Detetor HPGe e sua eletrônica
- Detetores de silício de barreira de superfície (Silicon Detectors)
- Bombas de vácuo

RELEVÂNCIA

O acelerador CV-28 possui 5 saídas de feixe operacionais, das quais três são dedicadas à produção de radiofármacos, uma multipropósito e a última, apesar de conter uma câmara de espalhamento, se encontra inativa. A relevância deste projeto está na possibilidade de análise e caracterização de materiais usando técnicas que envolvem o uso de feixe de prótons, tanto em ambiente em vácuo, quanto em ar. Este sistema de medidas será único no estado do Rio de Janeiro e possivelmente em instalações da CNEN.

OBJETIVOS

Objetivo Geral:

O objetivo deste projeto é a implantação de uma câmara de espalhamento e uma linha de feixe externo a serem montadas na CAVERNA 3 do CV-28. Esta linha permitirá o uso de técnicas nucleares analíticas por feixe de prótons, aplicadas à caracterização de diversos tipos de materiais.

Objetivos específicos:

Objetivo Específico 1: Avaliação da linha de feixe; Simulação da passagem do feixe até a câmara de espalhamento e feixe externo, com seus elementos de colimação e degradação em energia a fim de obter a melhor configuração para as energias usuais de aplicação das técnicas PIXE, RBS e PIGE;

Objetivo Específico 2: Montagem da câmara de espalhamento: detetores de barreira de superfície e raios X e eletrônica; sistema de monitoramento do feixe; bombas de vácuo; Testes do sistema;

Objetivo Específico 3: Testagem das condições de feixe e degradadores na câmara de espalhamento;

Objetivo Específico 4: Design e produção do nariz de extração do feixe em ar;

Objetivo Específico 5: Montagem do feixe externo: posicionamento do nariz e detetores de raios X e raios gama. Testes do sistema;

Objetivo Específico 6: Calibração da energia do feixe que chega na câmara de espalhamento e no feixe externo.

ATIVIDADES PROPOSTAS

Avaliação da estrutura da linha 3 para a sua adequação ao projeto;

Aquisição de elementos para a linha: detetores SDD (Silicon Drift Detector) e eletrônica; aquisição de material para usinagem de novas peças;

Simulação das condições de feixe, tipos de degradadores que serão utilizados;

Instalação de degradadores ao longo da linha que possibilitarão o controle da energia do feixe;

Design e fabricação de peças a serem usadas na extração do feixe, dentre outras necessárias para a instalação da linha (o IEN-CNEN conta com uma oficina mecânica para auxiliar nesta questão);

Montagem da câmara de espalhamento: posicionamento dos detetores, copo de Faraday, sistema de vácuo e teste da eletrônica;

Testes de vácuo: verificação da câmara de espalhamento quanto à vedação após toda a eletrônica e detetores estarem corretamente montados;

Calibração da energia do feixe e medida da corrente no alvo;

Caracterização do sistema montado na câmara de espalhamento com amostras padrão;

Montagem do nariz para a extração do feixe: teste de vácuo;

Montagem dos detetores e teste de eletrônica: feixe externo;

Calibração da energia e medida de corrente no feixe externo;

Caracterização do sistema de feixe externo: medidas com amostras padrão;

Treinamento de pessoal para a operação da linha.

RESULTADOS ESPERADOS

A instalação de uma linha de feixe dedica ao uso de técnicas nucleares para a análise de materiais no ciclotron CV-28 da DIRAD abrirá portas para a realização de análises e testes de grande interesse acadêmico e para prestação de serviços tais como:

Uso da técnica PIXE – Proton Induced X-Ray Emission - para a caracterização elementar não destrutiva usada nos campos da física, química, geologia, arqueologia, preservação do ecossistema e restauração de obras de artes;

Uso da técnica RBS – Rutherford Back Scattering – para a análise da composição e espessura de camadas superficiais de materiais com aplicações em áreas do conhecimento como eletrônica, nanotecnologias e desenvolvimento de detectores;

Geração de recursos humanos com a formação de estudantes de iniciação científica.

Apresentação de trabalhos em congressos e publicação de artigos científicos em periódico internacional.

CRONOGRAMA

O cronograma a seguir é apresentado com trimestres em numeração sequencial referente a dois anos.

Atividades	Objetivo específico	2ºtri 2022	3ºtri 2022	4ºtri 2022	1ºtri 2023	2ºtri 2023	3ºtri 2023	4ºtri 2024	1ºtri 2025
a	1	X							
b	1	X	X	X					
c	1	X							
d	1		X	X					
e	4		X	X					
f	2			X	X	X			
g	2				X	X			
h	3				X	X			
i	6					X	X		
j	5						X		
k	5						X	X	

l	5							X	
m	6							X	X
n	6							X	X

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Yuksel, A.N., Turemen, G., Bulut, S., Serin, N.O., Yavas, O., Design of beam instrumentation for in-vacuum materials irradiation and testing in a 30 MeV medical cyclotron. *NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH, SECTION A: ACCELERATORS, SPECTROMETERS, DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT*, 977, 2020.
- [2] [Rodriguez Manso](#), [A. B. McIntosh](#), [G. F. Peaslee](#), [J. Gauthier](#), [K. Hagel](#), [L. Heilborn](#), [A. Jedele](#), [M. McCarthy](#), [Y. Pajouhafsar](#), [E. Salas](#), [A. Zarrella](#), [A. Wakhle](#), and [S. Yennello](#), Implementing PIXE and PIGE at Texas A&M University cyclotron institute, *AIP CONFERENCE PROCEEDINGS* **2160**,050023 (2019)
- [3] Choi, Yeon-Gyeong, Kim, Yu-Seok. External beam's nozzle design for the CRC cyclotron PIXE/PIGE. *JOURNAL OF THE KOREAN PHYSICAL SOCIETY* **66**, 394-398 (2015).
- [4] Ragheb, D., Koumeir, C., Métivier, V., Gaudillot, J., Guertin, A., Haddad, F., Michel, N., Servagent, N.. Development of a PIXE method at high energy with the ARRONAX cyclotron. *JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY* **302**, 2014.
- [5] Park, Sae-Hoon, Kim, Yu-Seok. Characterization of the beam profile for the PIXE/PIGE beam line at the CRC proton cyclotron. *JOURNAL OF THE KOREAN PHYSICAL SOCIETY* **63**, 2013.
- [6] Mathis, F., Othmane, G., Vrielynck, O., Calvo del Castillo, H., Chêne, G., Dupuis, T., Strivay, D., Combined PIXE/PIGE and IBIL with external beam applied to the analysis of Merovingian glass beads. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **268** (11-12), pp. 2078-2082, 2010.
- [7] Chris Jeynes, Chapter 10 - Ion beam analysis for cultural heritage, Editor(s): Mieke Adriaens, Mark Dowsett, Spectroscopy, Diffraction and Tomography in Art and Heritage Science, *Elsevier*, 2021, Pages 335-364, ISBN 9780128188606.
- [8] Alessandro Zucchiatti, Ion beam analysis for the study of our cultural heritage. A short history and its milestones, *NUCLEAR INSTRUMENTS AND*

METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B: BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS **452**, 2019.

[9] [Silva, T.F.](#), Rodrigues, C.L., [Added, N.](#), Rizzutto, M.A., Tabacniks, M.H., Mangiarotti, A., Curado, J.F., Aguirre, F.R., Agüero, N.F., Allegro, P.R.P., Campos, P.H.O.V., Restrepo, J.M., Trindade, G.F., Antonio, M.R., Assis, R.F., Leite, A.R., Elemental mapping of large samples by external ion beam analysis with sub-millimeter resolution and its applications. *NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B-BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS* **422**, p. 68-77, 2018.

[10] [Jean-Claude Dran](#) and [Thomas Calligaro](#), Ion beam analysis in cultural heritage studies: Milestones and perspectives, *AIP CONFERENCE PROCEEDINGS* **1530**, 11-24 (2013).

[11] Dimosthenis Sokaras, Euthimios Bistekos, Lambros Georgiou, Joseph Salomon, Mladen Bogovac, Eleni Aloupi-Siotis, Vasilis Paschalis, Ioanna Aslani, Sofia Karabagia, Anastasios Lagoyannis, Sotirios Harissopoulos, Vasiliki Kantarelou, Andreas-Germanos Karydas, The new external ion beam analysis setup at the Demokritos Tandem accelerator and first applications in cultural heritage. *NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B: BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS* **269**, Issue 5, p. 519-527, 2011.

[12] Vadrucci, M, Mazzinghi, A, Sorrentino, B, et al. Characterisation of ancient Roman wall-painting fragments using non-destructive IBA and MA-XRF techniques. *X-Ray Spectrom* **49** 668– 678, 2020.

[13] Eixas, L.E., Finco, S., Silveira, M.A.G., [Medina, N. H.](#), Gimenez, S. P., Study of Proton Radiation Effects Among Diamond and Rectangular Gate MOSFET Layouts. *MATERIALS RESEARCH EXPRESS* **4**, P. 015901, 2017.

[14] Johansson, T.B., Akselsson, R., Johansson, S.A.E., X-ray analysis: Elemental trace analysis at the 10–12 g level *NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS* **84** (1), 141-143, 1970.

[15] Choi, Yeon-Gyeong, Kim, Yu-Seok. External beam's nozzle design for the CRC cyclotron PIXE/PIGE. *JOURNAL OF THE KOREAN PHYSICAL SOCIETY* **66**, 394-398, 2015.

[16] James F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, SRIM – The stopping and range of ions in matter, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **268**, Issues 11–12, Pages 1818-1823, 2010.