

Índice

Introdução.....	1
Capítulo I – O radioisótopo ^7Be	
Berílio.....	3
O isótopo ^7Be	4
Utilização de ^7Be para dopagem de semicondutores.....	5
Fotoluminescência e DLTS.....	6
Capítulo II – A produção de ^7Be	
Feixe incidente de ^3He v.s. ^7Be produzido.....	8
Suporte para alvo e amostras na câmara de dispersão do ciclotrão..	9
Espessura do alvo de carbono e energia do feixe incidente.....	10
Atenuadores de alumínio.....	15
Capítulo III – Simulações	
Simulações com o programa TRIM Monte Carlo.....	20
Capítulo IV – Irradiações no ciclotrão	
Irradiações e análise dos resultados.....	25
Capítulo V – Evaporação de ^7Be das folhas de carbono	
Experiências de evaporação.....	42
Capítulo VI – O ciclotrão isócrona no Institut für Strahlen- und Kernphysik – Bona	
Planta e esquemas do ciclotrão.....	48
Capítulo VII – Implantação no separador de isótopos	
O separador de isótopos do ISKP.....	57
Primeiro teste de implantação.....	58
Segundo teste de implantação.....	58
Conclusões Finais.....	60
Referências Bibliográficas.....	61
Agradecimentos.....	62
Anexos.....	63

Introdução

Este trabalho de estágio tem como tema a produção e implantação de recuo do isótopo ^7Be no ciclotrão isócrono do Institut für Strahlen-und Kernphysik da Universidade de Bona.

Neste instituto faz-se uso da aplicação de métodos nucleares para investigar propriedades do estado sólido. Para tal, é utilizado o ciclotrão para produção de radioisótopos que serão implantados com o separador de isótopos de Bona para posteriormente efectuar medidas usando, por exemplo, o método das correlações angulares perturbadas.

Desde há algum tempo atrás, têm sido utilizados isótopos radioactivos para estudar propriedades de semicondutores, complementando outros métodos clássicos como, por exemplo, medições de efeito de Hall, espectroscopia transiente de nível profundo (DLTS) e fotoluminescência. Estes métodos „clássicos“ são muito sensíveis à presença de impurezas deliberadamente introduzidas ou não desejáveis, mas não permitem a identificação do elemento. Esta desvantagem pode ser ultrapassada, efectuando medidas em amostras dopadas com um isótopo radioactivo de uma impureza, visto que a variação de um sinal característico com o tempo (por exemplo, a amplitude de um pico num espectro de DLTS) pode ser comparada com o período de semi-desintegração do isótopo, obtendo-se assim uma identificação da impureza relacionada com o defeito em causa.

No seguimento da investigação das propriedades de semicondutores através de métodos nucleares, foi sugerido o estudo da influência do dopante Be do grupo IIA, nos semicondutores com hiato de energia grande, tais como o SiC e o GaN. O candidato escolhido para este estudo foi o isótopo ^7Be , cujo período de semi-desintegração é de 53 d, decaindo para o isótopo ^7Li , e podendo ser facilmente detectado devido à radiação γ de 478keV que emite neste decaimento.

As reacções de produção convencionais para este isótopo a partir de Li natural são (p,xn) ou (d,xn) . No entanto existem várias dificuldades relacionadas com a produção e manipulação de alvos de Li metálico ou compostos de Li, e estes não permitem a utilização de feixes de correntes elevadas. Assim sendo, pensou-se em estudar uma reacção alternativa, nomeadamente, $^{12}\text{C}(^3\text{He},2\alpha)^7\text{Be}$, que se apresenta como mais vantajosa por diversos motivos. Esta reacção tem uma secção eficaz relativamente elevada ($\sim 100\text{mb}$ para partículas incidentes de ^3He com 19MeV), o alvo de carbono natural é facilmente produzido e pode suportar feixes de elevadas correntes. Os produtos desta reacção são emitidos com uma grande energia de recuo, obtendo-se partículas de ^7Be com energias da ordem das dezenas de MeV o que permite uma implantação de recuo imediata.

Este método tem apenas um factor desfavorável, nomeadamente, o elevado custo do gás de ^3He utilizado na produção do feixe. No entanto, devido ao baixo consumo da fonte de iões do ciclotrão, a produção do isótopo através desta reacção torna-se bastante tolerável.

Assim sendo, durante este estágio foi estudada a reacção de produção e a implantação de recuo do isótopo ^7Be . Para tal foi utilizado um suporte de amostras projectado pelo Dr. R.Vianden, para ser colocado no interior de uma câmara de dispersão no ciclotrão, onde se procedeu à irradiação das várias amostras utilizadas neste estudo. Foram efectuados estudos por forma a escolher a energia que permite produzir a reacção na região de máxima secção eficaz, estudos sobre o rendimento da reacção, alcance das partículas implantadas no alvo através do método de pilha de folhas e também a distribuição angular da actividade. Neste projecto fez-se também um estudo sobre a possibilidade de extrair actividade de ^7Be produzido na folha de carbono utilizada para parar o feixe.

Em comparação com outras formas de produção do radioisótopo ^7Be , este método revelou-se bastante versátil e adequado às capacidades do ciclotrão deste instituto, uma vez que o ^3He é uma boa partícula para produzir reacções nucleares, a fonte do ciclotrão permite

manter um baixo consumo de gás, os alvos de carbono facilitam a manipulação devido à sua maior estabilidade, estão facilmente disponíveis e têm uma duração maior. Esta reacção de produção de ^7Be tem ainda uma secção eficaz razoavelmente boa.

No que se segue, será feita uma abordagem aos seguintes tópicos:

- O isótopo ^7Be ;
- Utilização de ^7Be para dopagem de semicondutores;
- Processo de produção do radioisótopo;
- Processo de implantação do radioisótopo;
- Simulações usando o programa TRIM Monte Carlo;
- Irradiações no ciclotrão;
- Evaporação de ^7Be das folhas de carbono para estudos de difusão;
- O ciclotrão isócrono do Institut für Strahlen- und Kernphysik;
- Implantações no separador de isótopos;
- Conclusões e comentários sobre os resultados.

Capítulo I – O radioisótopo ^7Be

Berílio

O berílio é um elemento químico do grupo IIA, membro da família dos metais alcalino-terrosos. Foi descoberto em 1798 por Louis Nicolas Vauquelin e isolado pela primeira vez em 1828 por Friedrich Wöhler e Antoine Bussy. A maior fonte de berílio é o Berilo ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$), podendo também encontrar-se em vários outros minérios, a maioria dos quais, raros. No entanto, a percentagem de berílio nestes materiais nunca excede os 15% e encontra-se sob a forma de óxido de berílio.

Este elemento tem uma cor cinzento-metálico, é muito leve e tem uma dureza apreciável. Com massa atómica de 9.0122, número atómico de 4, configuração electrónica (exterior) $(2)2s^2$, densidade de 1.84g/cm^3 , raio metálico de 1.11Å , raio iónico de 0.31Å , potencial de ionização de 9.32V , o elemento forma uma estrutura cristalina HCP (hexagonal close packed).

Devido ao pequeno tamanho do ião que forma, em relação aos outros membros da sua família, e devido também à sua elevada densidade de carga, o berílio tem características químicas e físicas que se destacam de entre as de elementos do mesmo grupo.

Tal como os outros elementos no seu grupo, é muito activo em contacto com o ar, formando de imediato um óxido. Todos os elementos do grupo IIA reagem vigorosamente com ácidos minerais diluídos (como p. ex. HCl), no entanto o berílio reage mais lentamente. Os sais de Be resultantes destas reacções são muito mais covalentes que os sais de outros elementos do mesmo grupo. Assim, os sais de Be em solução são fracos condutores de corrente e encontram-se altamente hidratados (devido ao pequeno tamanho do ião Be^{2+} e à forte afinidade com a molécula de água).

O berílio tem várias aplicações na indústria, como por exemplo na composição de ligas metálicas (especialmente na combinação com cobre), conferindo-lhes uma elevada resistência a forças de tensão. Encontra-se também em algum material cirúrgico, eléctrodos para solda, janelas para tubos de raios X, moderação de neutrões em reactores nucleares, etc.

Este elemento ocorre naturalmente com uma percentagem de 100% sob a forma do seu isótopo ^9Be , sendo este estável. Os restantes isótopos de berílio são visíveis na seguinte figura:

5	B 10.811 $6.9 \times 10^{-9}\%$	B7 1.4 MeV 3/2-	B8 770 ms 2+	B9 0.54 keV 3/2-	B10 19.9	B11 80.1	B12 20.20 ms 1+	B13 17.36 ms 3/2-	B14 13.8 ms 2-	B15 10.5 ms
4	Be 9.012182 $2.38 \times 10^{-9}\%$	Be6 92 keV 0+	Be7 53.29 d 3/2-	Be8 6.8 eV 0+	Be9 100	Be10 1.51E+6 y 0+	Be11 13.81 s 1/2+	Be12 23.6 ms 0+		Be14 4.35 ms 0+
3	Li 6.941 $1.86 \times 10^{-9}\%$	Li4 2-	Li5 1.5 MeV 3/2-	Li6 7.5	Li7 92.5	Li8 838 ms 2+	Li9 178.3 ms 3/2-	Li10 1.2 MeV	Li11 8.5 ms 3/2-	
										10

Fig. 1 – Isótopos de berílio

Na seguinte tabela, encontram-se resumidas algumas das características dos isótopos radioactivos de berílio:

Isótopo	Modo de decaimento	T _{1/2}
⁶ Be	2p	~ 0.4s
⁷ Be	EC (K)	53.3d
⁸ Be	2α	10 ⁻¹⁶ s
¹⁰ Be	β ⁻	2.5x10 ⁶ y
¹¹ Be	β ⁻ , α	13.6s
¹² Be	β ⁻	0.0114s
¹⁴ Be	β ⁻	4.35ms

Tabela 1 – Decaimento dos isótopos de berílio

O isótopo ⁷Be

O ⁷Be é o isótopo sobre o qual este estudo incide. Existem várias reacções que podem ser utilizadas para a produção deste radioisótopo, como por exemplo ⁷Li(p,n)⁷Be, ⁶Li(d,n)⁷Be, ¹⁰B(p, a)⁷Be e ¹²C(³He, 2a)⁷Be. No entanto, devido a questões relacionadas com a produção e manipulação do material alvo (intensidade da corrente nos feixes utilizados) e com as características da fonte de iões do ciclotrão, optou-se pela utilização da reacção ¹²C(³He, 2a)⁷Be neste projecto. Esta reacção tem uma secção eficaz máxima de, aproximadamente 100mb, sendo este valor bastante razoável quando comparado com o mesmo valor para as outras reacções (580mb, 106mb e 8mb, respectivamente). Apresenta também a vantagem de o alvo de carbono natural ser de fácil produção e poder suportar feixes de elevadas correntes.

A função de excitação para a produção de ⁷Be através desta reacção, tem a seguinte forma:

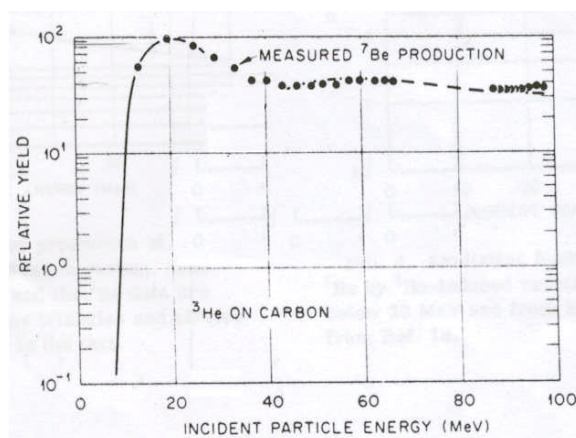


Fig. 2 – Função de excitação para a reacção I

Conclui-se a partir da forma da função de excitação, que para obter um rendimento máximo para esta reacção temos que utilizar partículas incidentes com energias na vizinhança de 20MeV, onde a secção eficaz tem um valor máximo de 100mb. Verifica-se também que, a partir de, aproximadamente, 30MeV a função de excitação tem uma forma aproximadamente

I „Excitation functions for Be7 production by light – ion bombardment of C12“ Fulmer, C. B. ; Goldberg, D. A. – Physical Review C, Volume 11, Número 1 - Janeiro 1975

constante, estabelecendo-se um patamar, em que a amplitude da secção eficaz é cerca de 2/5 (~40mb) do valor que se encontra no pico.

Para a produção deste isótopo é então necessário atender à forma da função de excitação, à energia do feixe de partículas incidentes, à espessura do alvo de carbono (de forma que à saída deste se tenha um máximo rendimento de ${}^7\text{Be}$) e à densidade deste, entre outros factores.

Tal como se viu na tabela 1, o isótopo ${}^7\text{Be}$ decai por captura electrónica de electrões da camada K, de acordo com o seguinte esquema de decaimento:

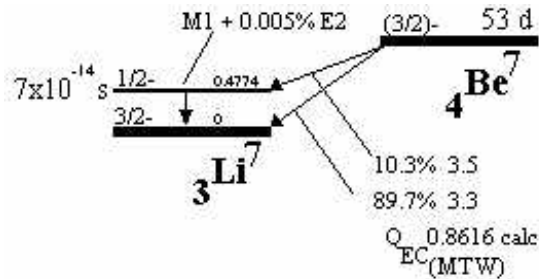


Fig. 3 – Esquema de decaimento do isótopo ${}^7\text{Be}$

Este isótopo decai em 10.3% dos casos para o estado excitado do núcleo de ${}^7\text{Li}$, emitindo um fóton γ com uma energia de 477.4keV após 73fs, quando decai para o estado fundamental do ${}^7\text{Li}$. Nos restantes 89.7% dos casos, decai também por captura electrónica para o estado fundamental do ${}^7\text{Li}$. Há que ter em atenção este facto para a análise quantitativa dos espectros das diversas amostras, uma vez que em apenas cerca de 10% dos casos de decaimento, é emitido um fóton γ que será detectado.

Utilização de ${}^7\text{Be}$ para dopagem de semicondutores

O nitreto de gálio é um material semiconductor utilizado para o desenvolvimento de dispositivos emissores de luz (LEDs e LDs). Devido ao facto de existirem inúmeras aplicações potenciais para estes dispositivos (semáforos, ecrãs de grandes dimensões para publicidade e informações, etc), tem-se dispendido um grande esforço na investigação deste material, assim como nos seus possíveis dopantes.

Os elementos do grupo II, Be, Mg, Ca, Zn e Cd são, potencialmente, bons dopantes tipo p em GaN, como aceitadores na posição do Ga, juntamente com o aceitador do grupo IV, o C na posição do N.

Foi primeiro evidenciada condução do tipo p em GaN, usando Mg como aceitador, continuando este a ser o aceitador mais comumente utilizado para LEDs e díodos laser. No entanto, verificou-se também condutividade tipo p em GaN, usando Be, Ca e C. A desvantagem destes aceitadores é o facto de possuírem uma energia de activação relativamente elevada, da ordem de 200meV, o que implica uma baixa eficiência de dopagem, de cerca de 1% (à temperatura ambiente, a energia da agitação térmica dos electrões não é suficiente para que a maioria passe da banda de valência para os níveis aceitadores). Existe no entanto evidência que ocorrem níveis aceitadores menos profundos em determinados casos.

Alguns estudos^{II} indicam que o Be poderá criar um nível aceitador a cerca de 100meV, sendo este facto comprovado por resultados experimentais, nomeadamente, estudos de fotoluminescência efectuados em filmes dopados com baixas concentrações de Be. No entanto, quando se aumenta a quantidade de Be na dopagem, estes níveis menos profundos desaparecem e são substituídos por níveis mais profundos.

II "Acceptors in GaN and related compounds" – Orton, J.W. e Foxon, C.T. – Janeiro de 1998

O material semiconductor carboneto de silício tem também importantes aplicações, na área dos dispositivos optoelectrónicos (LEDs e LDs), electrónica de alta temperatura e potência e como tal, é outro material que tem sido alvo de intensa investigação. Sendo o SiC um composto do tipo IV-IV, o berílio comporta-se teoricamente como um duplo aceitador. De acordo com algumas fontes bibliográficas^{III}, o Be cria dois níveis aceitadores em SiC, nomeadamente em 0.42 e 0.60eV.

No estudo das propriedades de semicondutores, utilizam-se normalmente os métodos „clássicos“ de efeito de Hall, DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) e fotoluminescência. Estes métodos são extremamente sensíveis à presença de impurezas no material semiconductor mas não permitem uma identificação clara do elemento que constitui a impureza. Utilizando um isótopo radioactivo de uma impureza como dopante do material, a variação da intensidade de um sinal típico com o tempo pode ser comparada com o período de semi-desintegração do isótopo utilizado, permitindo desta forma identificar a impureza relacionada com o defeito criado no material.

Fotoluminescência e DLTS

A espectroscopia de excitação de fotoluminescência é uma técnica de medição que permite obter informação sobre os processos de excitação ópticos em semicondutores. Excitando uma amostra de material semiconductor com uma fonte de luz (normalmente um laser), a radiação será absorvida produzindo electrões na banda de condução e buracos na banda de valência. Desta forma gera-se um estado de não equilíbrio no semiconductor. Os electrões e os buracos irão recombinar-se de diferentes formas para a restituir o equilíbrio, conforme o tipo de impurezas e defeitos no material. Dessas recombinações resulta a emissão de luminescência a partir da amostra. Focando a luminescência num espectrómetro, é possível obter o espectro de fotoluminescência e portanto identificar defeitos existentes no material.

A técnica de espectroscopia transiente de níveis profundos (DLTS) baseia-se no processamento de sinais gerados a partir de capacidades transientes que resultam da presença de níveis profundos na zona de depleção de um díodo. Os sinais transientes são normalmente excitados pela aplicação sucessiva de polarizações directas e indirectas num díodo. Durante o impulso de polarização directa, os níveis profundos são preenchidos com electrões (ou buracos, dependendo do tipo de díodo) uma vez que ocorre o colapso da zona de depleção. Durante a impulso de polarização inversa, a uma temperatura apropriada, os electrões podem ser termicamente emitidos pelos níveis. Como os electrões são emitidos, deixam defeitos positivamente ionizados. Este facto altera a capacidade do díodo, e a resposta transiente da capacidade torna-se um indicador da emissão de electrões dos níveis profundos.

Esta técnica processa os transientes de capacidade de tal forma que apresenta os resultados sobre a forma de espectro : um pico de „capacidade“ para cada nível profundo. Uma propriedade fundamental destes transientes é o facto de serem dependentes da temperatura. Visto que dois níveis profundos distintos têm propriedades térmicas diferentes, picos associados a diferentes defeitos aparecem em diferentes temperaturas, e o sistema produz um espectro característico dos níveis profundos no material. A partir das amplitudes dos picos, é possível deduzir a concentração de cada nível profundo.

III “Diffusion of beryllium in silicon carbide” – Maslakovets, Yu. P.; Mokhov, E.N.; Vodakov, Yu. A. e Lomakina, G. A. – Institute for Semiconductors, Academy of Sciences of the USSR, Leningrad – Soviet Physics- Solid State, Vol. 10, Nº. 3, Setembro de 1968.

Na seguinte figura mostra-se um espectro de DLTS, adquirido no Institut für Festkörperphysik da Universidade Friedrich-Schiller em Jena, relativo a uma amostra de SiC.

Foram adquiridos vários espectros sobre a mesma amostra com intervalos de tempo que permitissem concluir sobre o tipo de impureza detectada.

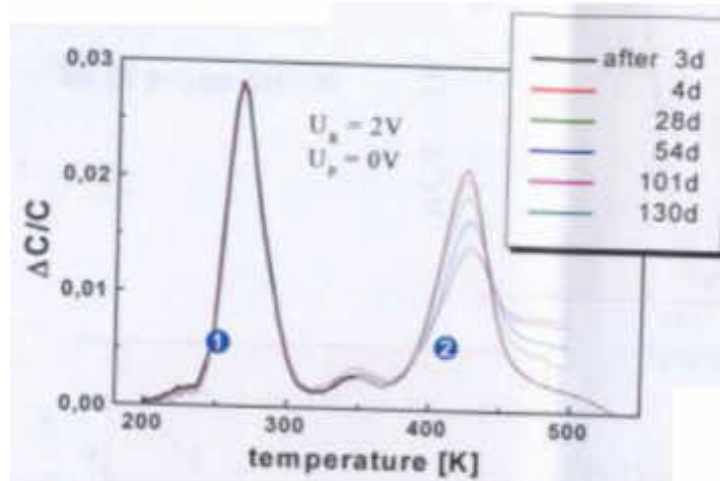


Fig. 4 – Espectro de DLTS

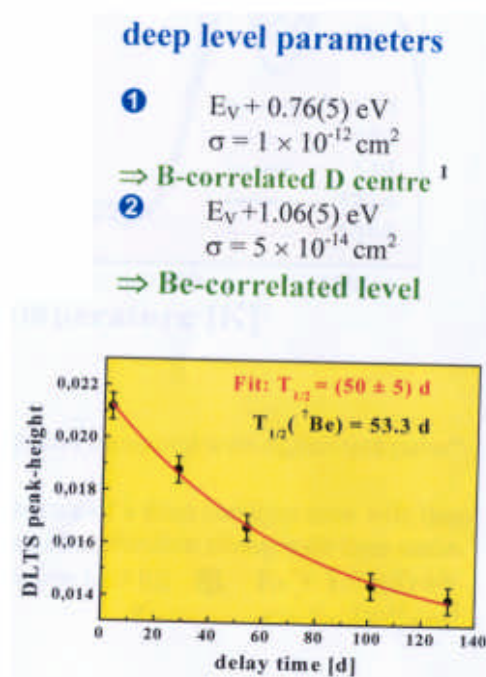


Fig. 5 – Comparação entre a diminuição do pico DLTS e o período de semi-desintegração do radioisótopo Be⁷

Pensa-se que o defeito identificado por este pico está associado ao ⁷Be implantado na amostra, uma vez que a diminuição da amplitude do pico com o tempo, é consistente com o período de semi-desintegração daquele radioisótopo.

Capítulo II – A produção de ^7Be

Feixe incidente de ^3He v.s. ^7Be produzido

Neste projecto, o isótopo ^7Be foi produzido com base na reacção $^{12}\text{C}(^3\text{He},2\alpha)^7\text{Be}$ e na forma da sua secção eficaz. Assim, como partículas incidentes utilizamos um feixe de ^3He que é produzido a partir de ^3He gasoso, na fonte de iões do ciclotrão de Bona. Este feixe deve ser produzido com uma energia tal que a reacção ocorra na região máxima da secção eficaz. A energia do feixe incidente deve também ser escolhida conforme a espessura do alvo de carbono que vai ser utilizado para produzir a reacção. Assim é, visto que a perda de energia das partículas de ^3He varia com a sua energia inicial, com a espessura da folha de carbono e a densidade desta. Na seguinte tabela, mostra-se a perda média de energia de partículas de ^3He para várias energias iniciais, várias espessuras do alvo de carbono, para um ângulo de incidência de 0° e para uma densidade do alvo de carbono de $\rho=2.25\text{g/cm}^3$ (estes resultados foram obtidos com o programa TRIM 2000):

E^3_{He} (MeV)	Espessura de ^{12}C (μm)	Perda de energia (MeV)
42	100	3
30	100	4
25	100	5
25	60	3
25	40	1.8
25	30	1.4

Tabela 2 – Perda de energia dos iões He3 na folha de carbono

A energia escolhida para o feixe de ^3He deve ainda ter em conta a energia das partículas de ^7Be produzidas. A reacção deve ocorrer com um máximo de intensidade perto do final da folha de carbono, de forma a que as partículas de ^7Be percam um mínimo de energia quando escapam da folha.

Utilizando o programa de simulações “Relativistic Kinematics of two particles reactions”, foi possível obter a energia com que as partículas de ^7Be são formadas e emitidas em diversos ângulos, para uma determinada energia das partículas de ^3He . Na seguinte tabela mostram-se os valores obtidos para $E^3_{\text{He}} = 23\text{MeV}$:

θ_{LAB}	E^7_{Be} (MeV)
10	16.2
15	15.9
20	15.4
25	14.8
30	14.1
35	13.3
40	12.5
45	11.6
50	10.7
55	9.8
60	8.9

Tabela 3 – Energia inicial das partículas de Be7 emitidas em diversos ângulos para $E(\text{He}3)=23\text{MeV}$

Suporte para alvo e amostras na câmara de dispersão do ciclotrão

Para a implantação de recuo das partículas de ${}^7\text{Be}$ produzidas através da reacção descrita, foi utilizado um suporte para o alvo de carbono, para as amostras que contituem o alvo das partículas de ${}^7\text{Be}$ e para uma pequena barra de carbono utilizada para parar o feixe de ${}^3\text{He}$. No seguinte esquema podemos ver a posição do alvo primário de carbono, dos alvos secundários de SiC ou GaN e da barra para parar o feixe:

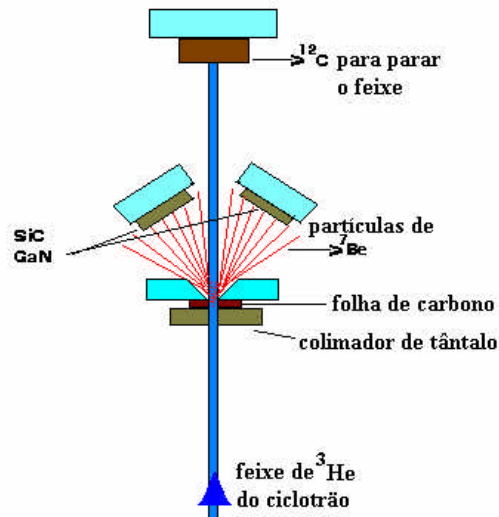


Fig. 5 – Esquema do suporte, colimador, folhas de carbono e alvos

Na figura seguinte podemos ver em detalhe este suporte projectado pelo Dr. R. Vianden:

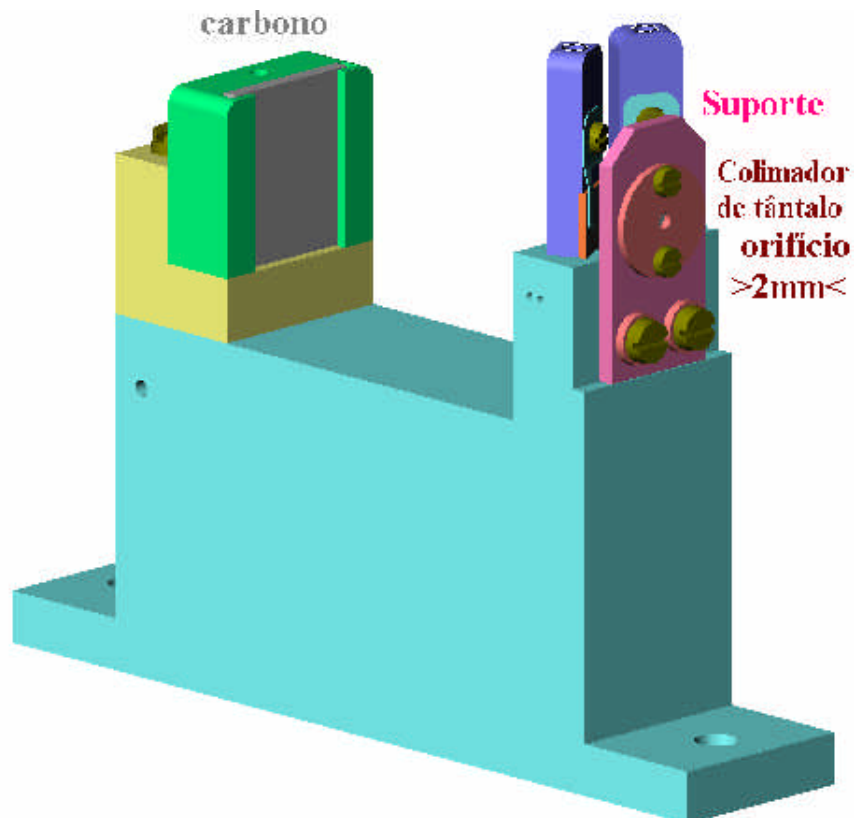


Fig. 6 – Suporte de amostras utilizado para a implantação de recuo.
A folha de carbono encontra-se entre o suporte e o colimador de tântalo.
É também visível a folha de carbono utilizada para parar o feixe

Devido à forma do suporte, apenas nos interessa considerar as partículas de ${}^7\text{Be}$ produzidas na folha de ${}^{12}\text{C}$ e emitidas segundo um ângulo (em relação ao eixo do feixe) compreendido entre $8,91^\circ$ e $65,51^\circ$. No entanto, para os cálculos efectuados durante o projecto, consideramos o intervalo de 10° a 60° :

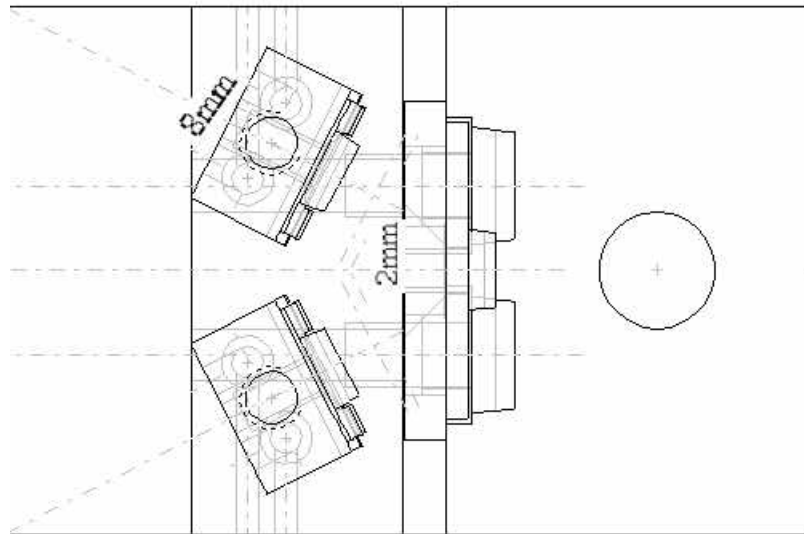


Fig. 7 – Esquema do suporte para amostras evidenciando o colimador de tântalo e suporte para os alvos de SiC ou GaN

Espessura do alvo de carbono e energia do feixe incidente

Tal como foi dito, dois dos parâmetros que se podem controlar neste projecto são a espessura e a densidade do alvo de carbono. Foi efectuado um estudo em que se variaram os vários parâmetros possíveis, de forma a encontrar a espessura ideal do alvo de carbono com o objectivo de maximizar a produção e a implantação de ${}^7\text{Be}$.

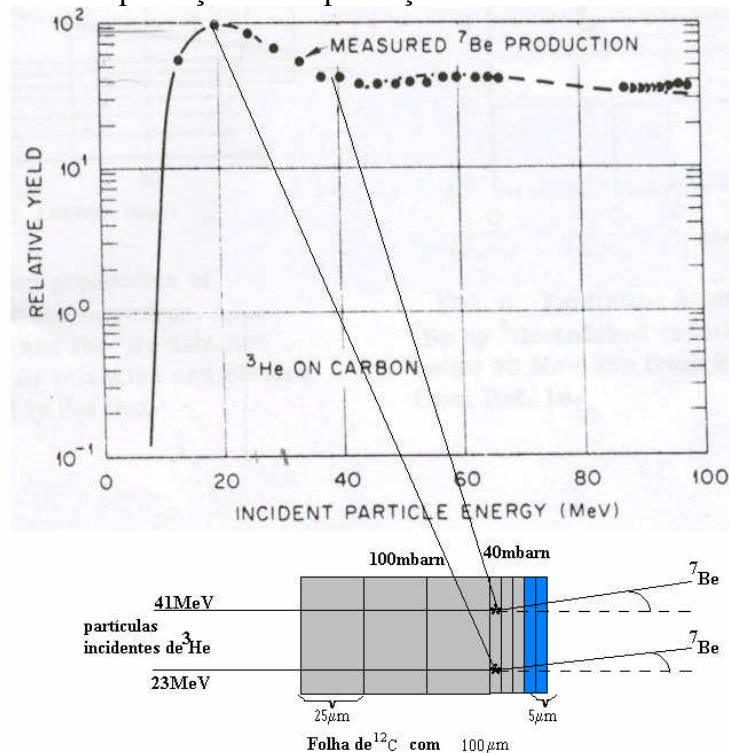


Fig. 8 – Energia das partículas incidentes de He3 v.s. espessura da folha de carbono e secção eficaz

No exemplo da figura anterior, vemos que, para uma folha de carbono ($\rho=2.25\text{g/cm}^3$) com uma espessura de $100\mu\text{m}$, utilizando partículas incidentes com 41MeV de energia, quando estas atingem o final da folha têm uma energia tal que a sua secção eficaz vale cerca de 40mbarn (estando portanto longe da condição ideal de produção). Se as partículas incidentes tiverem uma energia de 23MeV , no final da folha terão uma energia de aproximadamente 20MeV , situando-se próximo do pico da secção eficaz.

Este estudo foi efectuado recorrendo a um programa que utiliza o método de Monte Carlo para produzir simulações, nomeadamente TRIM 2000 produzido por J. P. Biersack e W. Eckstein. Analisemos então as seguintes situações consideradas:

- $E^3_{\text{He}}=25\text{MeV}$, $\theta=0^\circ$, $\text{esp.}_{\text{carb}}=100\mu\text{m}$, e perda de energia= 5MeV (ver tabela 2)

Neste caso temos, para as partículas de ^7Be formadas no início da folha (correspondentes às partículas de ^3He que aí param e dão origem à reacção em causa) uma energia de $E^7_{\text{Be}}=17.5\text{MeV}$. Introduzindo estes dados no programa TRIM verifica-se que estas partículas formadas neste local, são atenuadas pela folha de carbono, ficando no seu interior a uma profundidade de cerca de $28\mu\text{m}$. Verifica-se também que as únicas partículas com energia suficiente para abandonar o alvo, são aquelas formadas a uma profundidade de $78\mu\text{m}$. Então face a estas condições, e como o objectivo é maximizar a produção de ^7Be (portanto, é desejável eliminar a atenuação causada pela folha de carbono) pensou-se em reduzir a espessura do alvo de carbono.

- $E^3_{\text{He}}=25\text{MeV}$, $\theta=0^\circ$, $\text{esp.}_{\text{carb}}=60\mu\text{m}$, e perda de energia= 3MeV

Com estas condições, continuamos a verificar que o máximo alcance das partículas de ^7Be formadas no início da folha é de cerca de $28\mu\text{m}$. Se as partículas forem formadas no meio da folha, a cerca de $30\mu\text{m}$ de profundidade, têm uma energia inicial de 16.5MeV e ficam atenuadas a uma profundidade de $55.8\mu\text{m}$. Assim sendo, a espessura da folha de carbono foi reduzida de novo.

- $E^3_{\text{He}}=25\text{MeV}$, $\theta=0^\circ$, $\text{esp.}_{\text{carb}}=30\mu\text{m}$, e perda de energia= 1.4MeV

Neste caso, verifica-se que as partículas de ^7Be formadas no início do alvo de carbono, perdem uma quantidade de energia de cerca de 17.5MeV , abandonando o alvo com uma energia da ordem de algumas dezenas de eV. Uma partícula de ^7Be formada no final da folha, abandona-a com uma energia de 16.5MeV .

- $E^3_{\text{He}}=25\text{MeV}$, $\theta=0^\circ$, $\text{esp.}_{\text{carb}}=25\mu\text{m}$, e perda de energia= 1.1MeV

A energia das partículas de ^7Be formadas no início da folha é de 17.5MeV , enquanto que aquelas formadas perto do final da folha (tendo ainda que percorrer, por exemplo, $2\mu\text{m}$), têm uma energia de aproximadamente 16.7MeV e ao abandonarem o alvo têm 15.8MeV de energia. As que são formadas no centro da folha, têm uma energia inicial de 17.1MeV e após percorrerem os $12\mu\text{m}$ até à saída, têm uma energia de 10.9MeV .

Outro factor de grande relevância para a produção deste radioisótopo (tal como foi discutido no exemplo da página anterior) é a forma da secção eficaz, e por isso mesmo reduziu-se o valor da energia do feixe de partículas incidentes para 21MeV . Foi efectuada

uma simulação para o caso em que se utiliza uma espessura 25 μ m para o alvo, e verificou-se que a perda de energia das partículas de ^3He após atravessar o alvo é cerca de 1.3MeV. De forma a obter resultados mais precisos, este alvo de carbono foi dividido em cinco secções de 5 μ m cada.

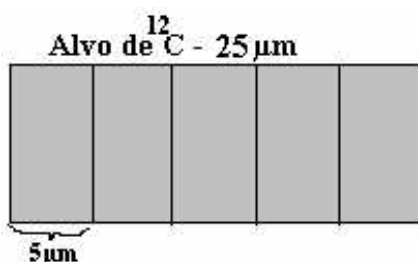


Fig. 9 – Folha de carbono com 25 μ m de espessura

Obtiveram-se os seguintes resultados:

Secção (5 μ m)	Energia final ^3He (MeV)	Energ. form. ^7Be (MeV)
1 ^a .	20.7	14.5
2 ^a .	20.5	14.3
3 ^a .	20.3	14.2
4 ^a .	20	14
5 ^a .	19.7	13.8

Tabela 4 – Energia de formação de Be7 a diferentes profundidades

O objectivo desta simulação é obter a energia de escape das partículas de ^7Be (quando saem da folha) produzidas a várias profundidades no alvo de carbono e emitidas nas várias direcções.

No entanto, por uma questão de estabilidade do alvo, fui aconselhado a utilizar um alvo mais espesso, com aproximadamente 100 μ m. Também um motivo de ordem técnica (relacionado com o funcionamento do ciclotrão com o gás utilizado para produzir este isótopo) fez com que optasse por utilizar um feixe com energia superior ao último caso considerado. Assim, decidi considerar um feixe incidente de ^3He com uma energia de 24.5MeV para as simulações. Com esta configuração de espessura de alvo de carbono e energia de feixe incidente, a quantidade de ^7Be produzida não é a máxima, mas sim a que melhor se adequa às condições de funcionamento do ciclotrão. Desta forma, optou-se por uma outra estratégia, nomeadamente, considerar apenas as partículas que se formam nos últimos 25 μ m da folha de carbono. Nesta região a energia do feixe de ^3He é tal que maximiza a secção eficaz (21MeV), remetendo-nos de novo para a situação anteriormente considerada. As partículas de ^7Be produzidas nos primeiros 75 μ m da folha de carbono serão aí atenuadas e as que são produzidas nessa região e abandonam o alvo de carbono, fazem-no com uma energia muito reduzida (<1MeV). Estas simulações foram feitas com base na relação entre a energia das partículas incidentes de ^3He e a energia de formação das partículas de ^7Be (tabela 3), calculando a quantidade de energia que as partículas de ^3He perdem ao atravessar uma certa espessura de carbono. Para uma determinada energia de ^3He , utilizando a referida relação, obtém-se a energia de formação das partículas de ^7Be a uma dada profundidade.

Na prática, foi utilizada uma folha de carbono com 111 μ m de espessura e uma densidade $\rho=1.3\text{g/cm}^3$, o que equivale a utilizar uma folha de ^{12}C de densidade normal ($\rho=2.25\text{g/cm}^3$) e com uma espessura de apenas 64 μ m. Com estas condições, há que utilizar diferentes valores de energia do feixe de ^3He para obtermos as mesmas condições finais.

Após efectuar uma simulação com as condições iniciais agora impostas, decidi utilizar uma energia de 23MeV para o feixe incidente. Assim, em vez de utilizarmos apenas os últimos 25 μ m da folha de carbono para produzir ^7Be , com esta folha de carbono estaremos a utilizar os últimos 43 μ m (devido à diferença de densidade).

Nesta situação há que dividir os últimos 43 μ m em cinco secções com uma espessura de 8.6 μ m cada, e verificar os resultados das simulações para a energia final das partículas de ^7Be (após abandonarem o alvo) para um feixe de energia inicial de 23MeV (quando atingem os últimos 43 μ m do alvo, as partículas de ^3He possuem uma energia de 21.2MeV). Obtiveram-se os seguintes resultados considerando que para a gama de energias em causa (23MeV e 21 – 20MeV) os factores indicados na tabela 3 continuam válidos:

θ_B	Secção 1 $E^3\text{He}=21.1\text{MeV}$	Secção 2 $E^3\text{He}=20.8\text{MeV}$	Secção 3 $E^3\text{He}=20.6\text{MeV}$	Secção 4 $E^3\text{He}=20.3\text{MeV}$	Secção 5 $E^3\text{He}=20.1\text{MeV}$	Secção extra $E^3\text{He}=20\text{MeV}$
10	14.85	14.64	14.5	14.29	14.15	14.08
20	14.12	13.91	13.78	13.58	13.44	13.38
30	12.93	12.75	12.63	12.44	12.32	12.26
40	11.46	11.29	11.19	11.02	10.91	10.86
50	9.81	9.67	9.58	9.44	9.34	9.3
60	8.16	8.05	7.97	7.85	7.78	7.74

Tabela 5 – Energia de formação das partículas de Be7 (MeV)

A informação na tabela 5 pode ser visualizada com o auxílio do seguinte gráfico:

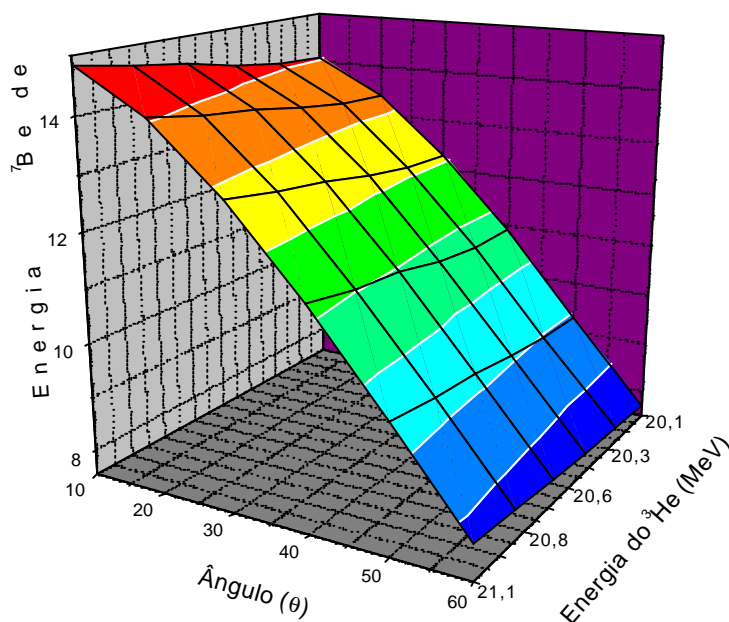


Fig. 10 – Energia de formação das partículas de Be7

A secção extra foi incluída após ter verificado que as partículas geradas no início da secção 1 são atenuadas na folha de carbono. Esta secção constitui os últimos 4.3 μ m da folha de carbono (metade final da secção 5).

Para a energia final das partículas de ^7Be temos:

θ_B	Secção 1	Secção 2	Secção 3	Secção 4	Secção 5	Secção extra
10	-	0.96	5.41	8.68	11.5	12.8
20	-	-	3.48	7.42	10.5	11.8
30	-	-	0.2	5.07	8.99	10.6
40	-	-	-	1.17	6.79	8.88
50	-	-	-	-	3.53	6.68
60	-	-	-	-	-	3.79

Tabela 6 – Energia de saída das partículas de Be7 (MeV)

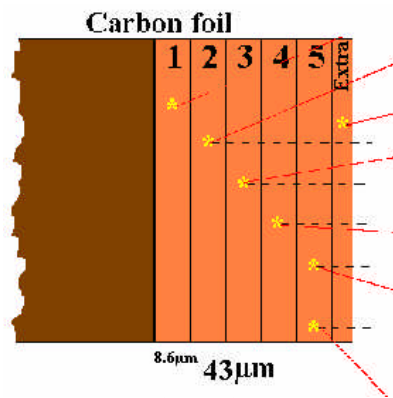


Fig. 11 – Parte final da folha de carbono

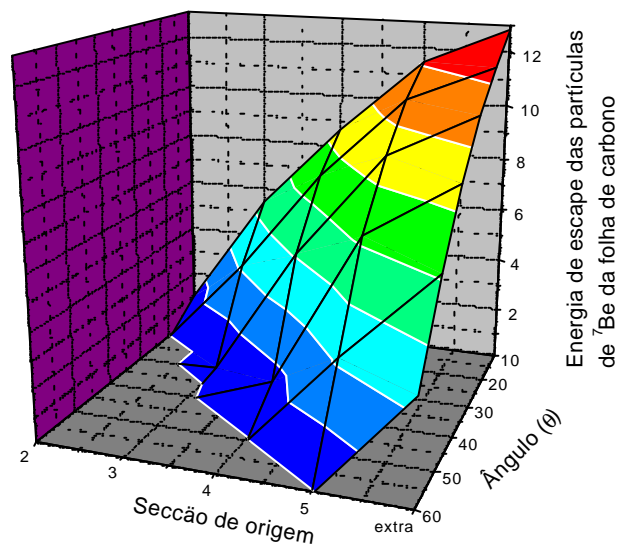


Fig. 12 – Energia de escape das partículas de Be7 da folha de carbono, conforme a secção de origem e o ângulo de emissão

O objectivo destas simulações é obter uma ideia da gama de energias com que as partículas saem do alvo de carbono. Como se viu, esta gama de energias varia entre algumas centenas de keV e 13MeV. Vemos assim que o perfil das partículas implantadas não é homogéneo. Por este motivo pensou-se em projectar atenuadores de alumínio com o objectivo de atenuar de forma diferente, partículas com energias diferentes (emitidas em diferentes direcções).

Atenuadores de alumínio

Estes atenuadores têm como objectivo atenuar as partículas conforme as suas energias, atenuando com maior intensidade as partículas mais energéticas e com menor intensidade aquelas com menores energias. Desta forma garante-se um perfil de implantação mais homogéneo.

Pretendíamos implantar partículas de ${}^7\text{Be}$ em duas profundidades diferentes. No primeiro caso, era desejável que as partículas se encontrassem mais perto da superfície, por isso as partículas de ${}^7\text{Be}$ deveriam ter energias da ordem de algumas centenas de keV. No segundo caso pretendia-se uma implantação mais profunda, e as partículas deveriam ter energias da ordem 1-2MeV.

Para o projecto dos atenuadores há que ter em conta certas considerações geométricas relacionadas com a forma do suporte de amostras. Assim é, devido ao facto de as partículas serem implantadas segundo vários ângulos, e o programa TRIM utilizar estes valores para os seus cálculos.

Temos então que estabelecer uma relação entre a normal ao feixe e a normal ao alvo. Tal como vimos a partir da forma dos suportes de amostras, apenas nos interessa considerar as partículas emitidas segundo direcções que fazem ângulos compreendidos entre 8.91° e 64.5° em relação à normal ao feixe.

Sendo N_t a normal ao alvo e N_b a normal ao feixe, vemos que o ângulo entre estas duas normais é de 26° :

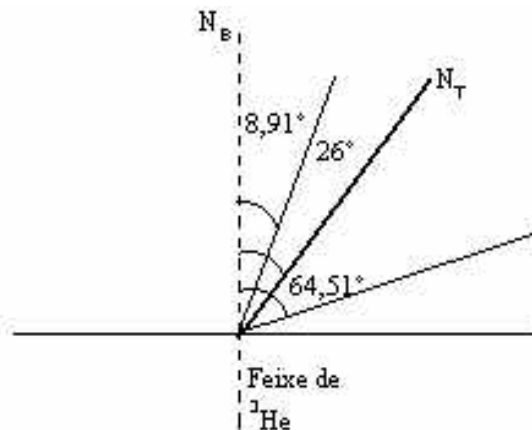


Fig. 13 – Relação entre a normal ao feixe e a normal ao alvo

Assim, podemos com base na seguinte equação, deduzir a relação entre os ângulos:

$$q(N_b) = 26^\circ + q(N_t) \quad (1)$$

Com estes dados, e aqueles apresentados na tabela 6, foi efectuado um estudo de simulação com o programa TRIM para avaliar o alcance das partículas de ${}^7\text{Be}$ em Al, uma vez que numa primeira fase de testes foram utilizados alvos de alumínio para avaliar a quantidade implantada de berílio e a forma como se distribui nos alvos:

$\theta_B ; \theta_T$	Energ. ${}^7\text{Be}$ (MeV)	Alcance-Al (μm)
10 ; -16	0.96	1.8
	5.41	7.4
	8.68	12.2
	11.5	17.3
	12.8	19.8
20 ; -6	3.48	5.04
	7.42	10.6
	10.5	16
30 ; 4	11.8	18.5
	0.2	0.65
	5.07	7.19
40 ; 14	8.99	13.3
	10.6	16.2
	1.17	2.08
50 ; 24	6.79	9.42
	8.88	12.8
	3.53	4.71
60 ; 34	6.68	8.76
	3.79	4.51

Tabela 7 – Alcance das partículas de Be7 em Al

Os valores desta tabela são utilizados para projectar os atenuadores de alumínio. Escolhendo uma determinada energia e ângulo das partículas de ${}^7\text{Be}$, testaram-se várias espessuras de alumínio, até se encontrar aquela que atenua as partículas até estas obterem as energias desejáveis.

Os atenuadores devem ter a forma apresentada na seguinte figura, em que a extremidade mais fina atenua as partículas menos energéticas e a mais espessa atenua as partículas mais energéticas:

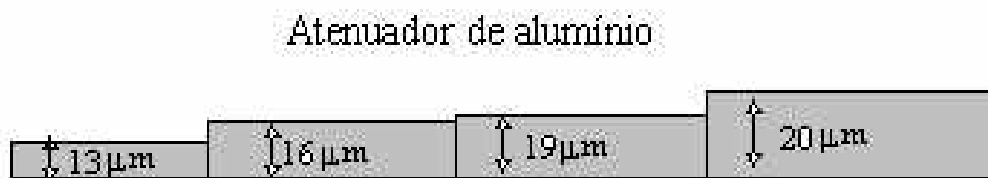


Fig. 14 – Esquema de um atenuador de alumínio

No entanto, na fase inicial deste projecto, durante a qual os atenuadores foram projectados, os valores utilizados para a energia das partículas incidentes de ${}^7\text{Be}$, foram calculados com base na tabela 3, extrapolados a partir de uma simulação feita para $E^3_{\text{He}}=41\text{MeV}$.

Posteriormente chegou-se à conclusão que a extrapolação não era válida visto que o erro cometido era de cerca de 20%. Assim, decidiu-se usar novamente o programa de simulações “Relativistic kinematics of two particle reactions” mas desta vez para $E^3_{\text{He}}=23\text{MeV}$.

Assim os atenuadores utilizados, foram projectados da seguinte forma, sendo a energia inicial das partículas de ${}^7\text{Be}$ obtida a partir da extrapolação citada:

Energ.inic. ${}^7\text{Be}$ (MeV)	θ_T	Espessura de Al (μm)	Energ.fin. ${}^7\text{Be}$ (MeV)
13.65	-16	21.75	0.138
12.67	-6	20.5	0.145
11.25	4	17.25	0.148
9.30	14	13	0.113
6.56	24	7.75	0.150
2.09	34	2	0.158

Tabela 8 – Atenuador mais espesso

A energia inicial é aquela com que as partículas escapam da folha de carbono, a espessura de alumínio é escolhida conforme a atenuação que se quer introduzir segundo um determinado ângulo, e a energia final, é a energia com que as partículas de ${}^7\text{Be}$ possuem após atravessar o atenuador.

Através dos valores na tabela, podemos projectar os atenuadores de alumínio. As dimensões dos atenuadores dependem das dimensões do porta amostras no suporte. Estes, têm as seguintes dimensões:

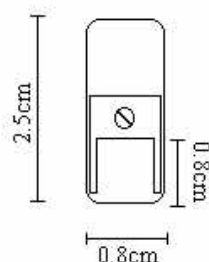


Fig. 15 – porta amostras

Então, para o caso do exemplo acima apresentado, e utilizando folhas de alumínio de diversas espessuras, foi projectado o seguinte atenuador:

Largura (mm)	Espessura (μm)
8	2
6.67	5
6.67	0.75
5.33	0.75
5.33	1.5
5.33	3
4	0.75
4	1.5
4	2
2.67	1.5
2.67	2
1.33	0.75

Tabela 9 – Projecto do atenuador mais espesso

Para projectar o segundo tipo de atenuadores (implantação mais profunda) procede-se da mesma forma, introduzindo os dados no TRIM e verificando qual a espessura de alumínio necessária para obter partículas com energias da ordem de 1-2MeV:

Energ.inic. ⁷ Be(MeV)	θ	Espessura de Al (μm)	Energ.fin. ⁷ Be (MeV)
13.65	-16	20	1.42
12.67	-6	19	1.20
11.25	4	15.5	1.39
9.30	14	11.5	1.21
6.56	24	6	1.44
2.09	34	0.75	1.20

Tabela 10 – atenuador mais fino

Assim, obtêm-se as seguintes características para este atenuador:

Largura (mm)	Espessura (μm)
8.00	0.75
6.67	0.75
6.67	1.5
6.67	3
5.33	4
5.33	1.5
4.00	2
4.00	2
2.67	1.5
2.67	2.
1.33	1.5

Tabela 11 – Projecto do atenuador mais fino

Este atenuador encontra-se representado na seguinte figura:

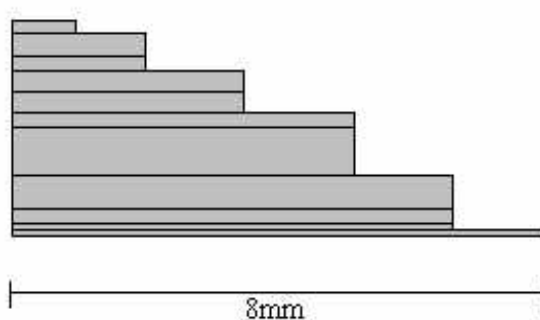


Fig. 16 – Esquema do atenuador de alumínio mais fino

Após estudos iniciais sobre o alcance das partículas de ⁷Be em SiC e GaN, chegou-se à conclusão (como se verá no próximo capítulo) que estas ficam na sua grande maioria a uma

profundidade de 15 μm para o caso do SiC e 12 μm no GaN. Assim sendo, pensou-se que devido ao facto de as partículas ficarem implantadas perto da superfície, não havia necessidade de utilizar os atenuadores de alumínio. A não utilização dos atenuadores simplificou a preparação do processo, uma vez que a montagem dos atenuadores requer alguns cuidados na manipulação de folhas tão finas.

No entanto, com base em informação obtida posteriormente, sobre as dimensões dos cristais de GaN crescidos sobre um substrato safira, nomeadamente o facto de que normalmente a espessura do cristal de GaN é de apenas 2 μm , sendo o resto constituído por safira, chegou-se à conclusão que é indispensável a utilização de atenuadores na implantação de ^7Be em nitreto de gálio.

No que diz respeito ao carboneto de silício, uma vez que estes cristais têm espessuras muito maiores, não é necessária a utilização dos atenuadores de alumínio, na implantação de ^7Be

Capítulo IV– Simulações

Simulações com o programa TRIM Monte Carlo

Tal como já foi referido anteriormente, uma das ferramentas essenciais para este projecto foi o programa TRIM (versão 2000). Este programa utiliza o método de Monte Carlo (baseado em procedimentos de amostragem estatística) para efectuar vários tipos de simulações relacionadas com a utilização de métodos nucleares em física do estado sólido. Para este projecto, efectuaram-se várias simulações de implantação de partículas (^3He e ^7Be) em vários materiais.

As simulações efectuadas com este programa, permitiram obter uma quantificação para a perda de energia do feixe de ^3He ao atravessar o alvo primário de carbono. A partir deste estudo foi possível ajustar a energia do feixe incidente, por forma a produzir um máximo de ^7Be próximo do final do alvo de carbono. Foi também possível obter uma ideia sobre a quantidade de energia que as partículas de ^7Be perdem, antes de abandonarem o alvo de carbono. Desta forma foi possível estabelecer uma gama de energias com que estas partículas abandonam o local de produção, e quantificar o perfil de profundidade destas partículas quando implantadas nos vários materiais.

Os valores presentes na tabela seguinte permitem visualizar o perfil de profundidade das partículas de ^7Be , quando implantadas em Al, GaN e SiC:

$\theta_B ; \theta_T$	Energ. ^7Be (MeV)	Alcance SiC(μm)	Alcan. GaN(μm)	Alcance-Al (μm)
10 ; -16	0.96	1.21	1.2	1.8
	5.41	5.07	4.4	7.4
	8.68	8.71	7.16	12.2
	11.5	12.4	9.96	17.3
	12.8	14.4	11.3	19.8
20 ; -6	3.48	3.43	3.13	5.04
	7.42	7.47	6.25	10.6
	10.5	11.4	9.21	16
	11.8	13.3	10.5	18.5
30 ; 4	0.2	0.47	0.44	0.65
	5.07	4.92	4.29	7.19
	8.99	9.44	7.7	13.3
	10.6	11.6	9.38	16.2
40 ; 14	1.17	1.4	1.37	2.08
	6.79	6.56	5.51	9.42
	8.88	9.05	7.4	12.8
50 ; 24	3.53	3.18	2.87	4.71
	6.68	6.06	5.13	8.76
60 ; 34	3.79	3.06	2.73	4.51

Tabela 12 – Alcance das partículas de Be7 em SiC, GaN e Al

A informação presente nesta tabela pode ser visualizada nos seguintes gráficos:

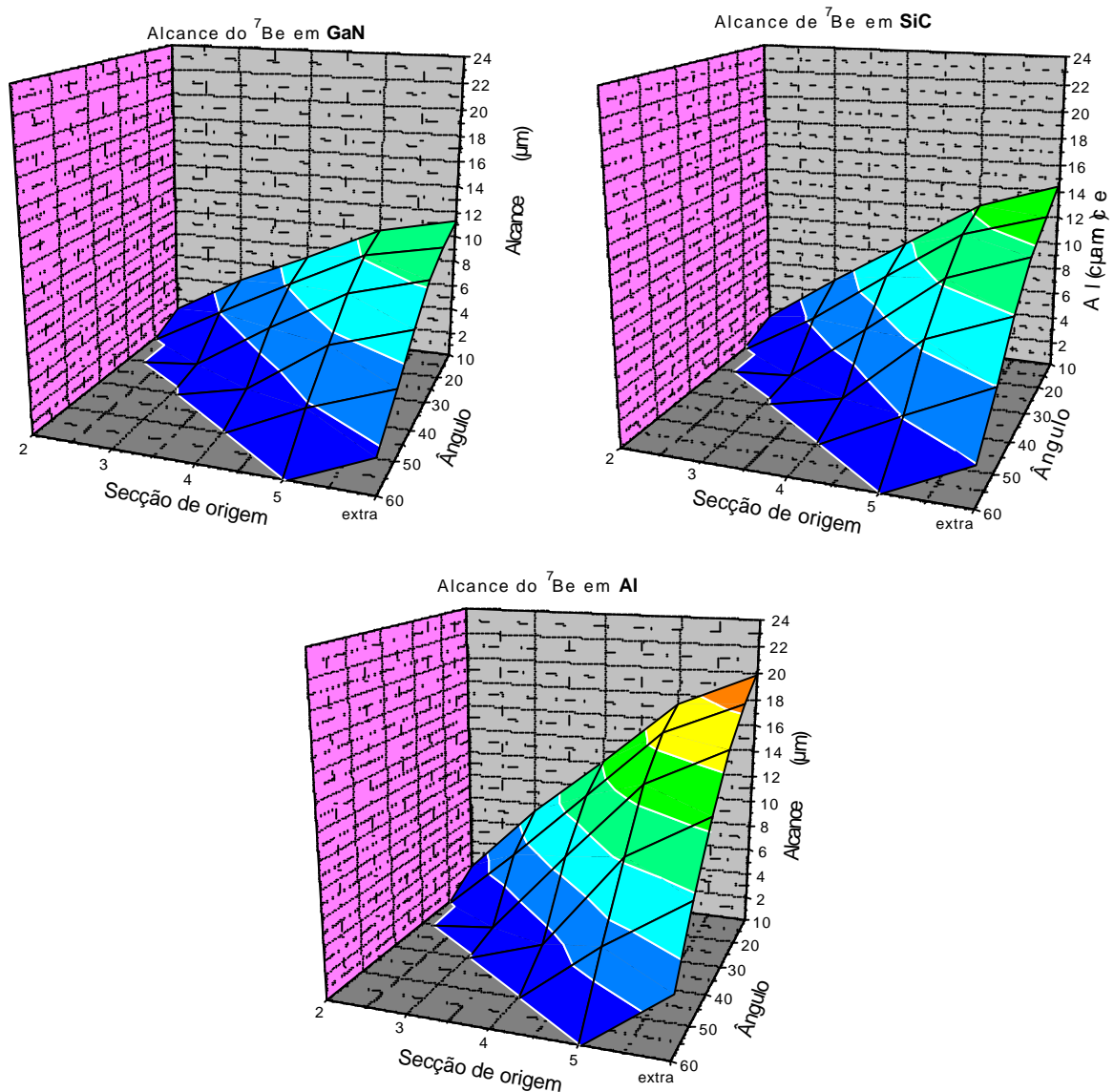


Fig. 17 – Alcance das partículas de Be7 em GaN, SiC e Al

Este comportamento de distribuição das partículas de ⁷Be era esperado, uma vez que a densidade do alumínio é menor que as do carboneto de silício e do nitreto de gálio ($\rho_{Al}=2.697\text{g/cm}^3$, $\rho_{SiC}=3.20\text{g/cm}^3$ e $\rho_{GaN}=6.15\text{g/cm}^3$). Assim, a implantação em alumínio atinge uma profundidade maior que nos casos do SiC e do GaN.

Dada a importância deste programa para o projecto, é importante verificar a precisão dos resultados por ele fornecidos. Para tal, procedeu-se a uma simples experiência que faz uso do método da pilha de folhas, para obter um estudo sobre a variação do número de contagens com a profundidade. Assim, foi utilizado um alvo de alumínio constituído por um conjunto de 12 folhas (de iguais dimensões) com uma espessura de $2\mu\text{m}$ cada, constituindo um alvo com uma espessura de $24\mu\text{m}$. Esta irradiação teve uma duração de 6h em que foi utilizado um feixe com uma corrente aproximada de $0.5\mu\text{A}$ e depositada uma carga total de 10.92mC . Foi adquirido um espectro para o conjunto de folhas, e posteriormente, espectros para cada folha, por forma a analisar a distribuição em profundidade da actividade:

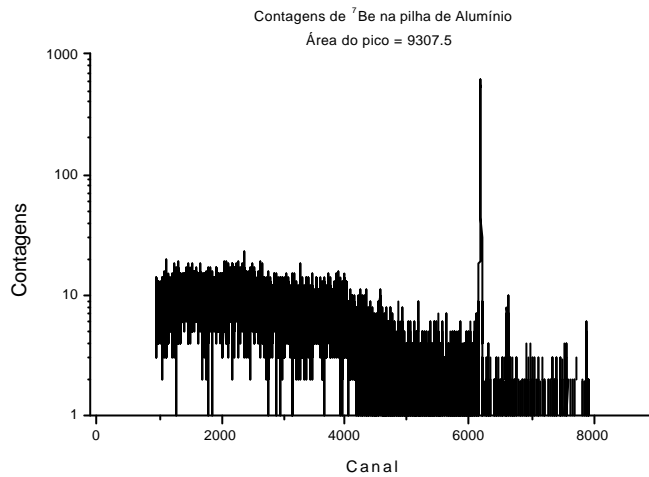


Fig. 18 – Espectro da pilha de folhas após a irradiação

O tempo de aquisição deste espectro foi de 5min e 5s. A actividade calculada foi de 2.215kBq, e a quantidade de ${}^7\text{Be}$ produzida foi de 1.43×10^{10} partículas.

Para calcular a actividade induzida nas amostras, foi utilizada a seguinte expressão:

$$A = C \times \Omega \times \varepsilon^{-1} \times B \quad (2)$$

sendo C a taxa de contagens, Ω o ângulo sólido em relação ao detector, ε a eficiência do detector para a energia da radiação em causa e B um factor relacionado com a forma de decaimento do isótopo. C é expresso em contagens/s, $\Omega = (4\pi d^2) / (\pi R^2)$ (na aproximação em que se considera que a fonte se encontra sobre a janela do detector – alternativamente utiliza-se a expressão $\Omega = (4\pi) / \{2\pi [1 - d / (d^2 + R^2)^{1/2}]\}$ sendo R o raio do detector e d a distância entre a fonte e o detector, válida para $d < 10\text{cm}$). Esta expressão para o cálculo da actividade de uma amostra é baseada na forma apresentada no capítulo VIID, página 427 (Measurement of source strength – Direct counting methods) do volume I, Kay Siegbahn.

Há que ter em atenção o facto de que foi utilizado um detector do tipo GEM – 30185 – P da companhia EG&G GmbH (detector coaxial de germânio puro), cujo cristal tem as seguintes características:

Diâmetro: 57.1mm
 Comprimento: 65.5mm
 Distância cápsula-cristal: 3mm
 Espessura de alumínio: 1.27mm
 Espessura de germânio: 0.7mm

A sua eficiência para a gama de energias em causa é $\varepsilon = 40.28\%$, dada através da equação (ver curva de eficiência em anexo):

$$\varepsilon(E) = 0.176162 + 1.22248 \times e^{-0.00352852 \times E} \quad (3)$$

Sendo o raio do detector utilizado, cerca de 3cm; o tempo de aquisição do espectro, 5 minutos e 5s (305s); a eficiência do detector para esta gama de energias é de 40.3%; o factor B (branching factor) é 10% (apenas 10% das desintegrações de ${}^7\text{Be}$ são acompanhadas de

emissão de um fóton com 477.6KeV);e considerando que a distância ao detector foi de 1cm, assim temos:

$$A=9307.5/305 \times 2/[1-1/(10)^{1/2}] \times 0.403^{-1} \times 10 = 2.2\text{kBq}$$

Foram posteriormente obtidos espectros das folhas individuais para quantificar o alcance em profundidade, das partículas de ^7Be em alumínio. Na seguinte figura mostra-se, como exemplo, os espectros das duas primeiras folhas:

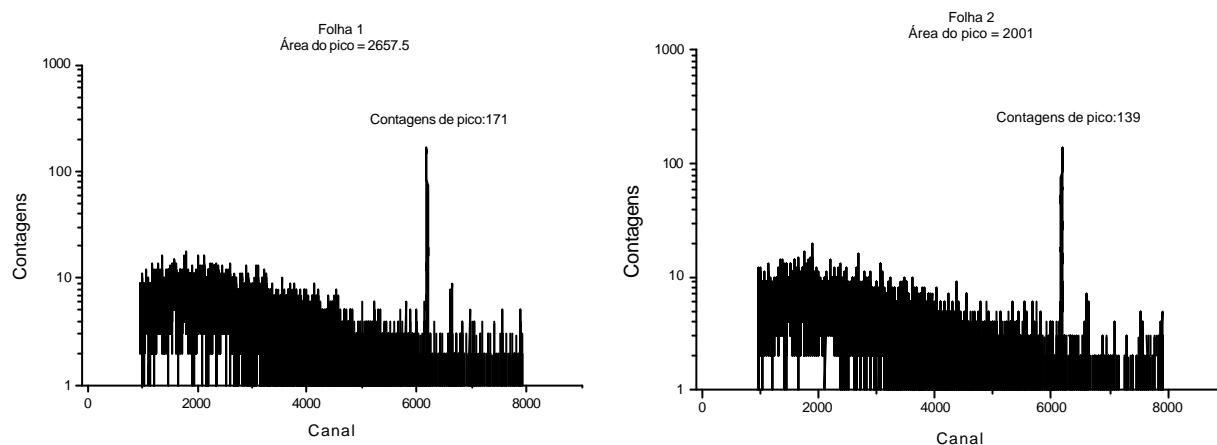


Fig. 19 – Dois espectros das folhas na pilha. A primeira folha tem um total de 2658 contagens enquanto que a segunda tem 2001 contagens

A aquisição dos espectros foi feita com o programa Accuspec da Nuclear Data Inc. Após a aquisição, os dados foram introduzidos no programa Origin, para se proceder a uma análise dos mesmos:

Espessura [μm]	Área do pico
2	2658
4	2001
6	1747
8	1228
10	1064
12	409
14	408
16	281
18	185
20	60
22	51
24	38

Tabela 13 – Contagens de Be7 nas folhas de alumínio

Estes dados podem ser visualizados no seguinte gráfico:

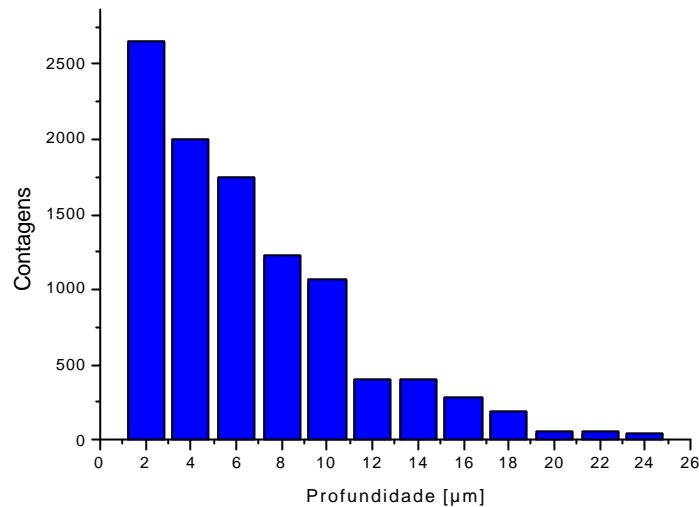


Fig. 20 – Distribuição da actividade de ⁷Be com a profundidade do alvo de alumínio

A partir desta informação podemos concluir que a grande maioria das partículas implantadas, situa-se a uma profundidade de 10µm em alumínio e que o alcance máximo das partículas é de 24µm. Como se pode ver nos gráficos anteriores, obtidos através de simulações com o programa TRIM, o alcance previsto é de cerca de 20µm. Conclui-se portanto que, podemos confiar nos resultados obtidos com o programa de simulações. Desta forma podemos aplicar os resultados obtidos nas simulações para o GaN e para o SiC para concluir sobre a profundidade a que as partículas de ⁷Be são implantadas nestes materiais.

Para se adquirirem dados experimentais que permitam obter o tipo de informação que os gráficos da figura 16 apresentam, é necessário utilizar o método da pilha de folhas combinado com uma análise da distribuição angular. Isto poderia ser feito da seguinte forma:

- irradiando a pilha de folhas;
- identificando cada folha;
- separando-as após estarem identificadas;
- adquirindo espectros para obter informação sobre a distribuição em profundidade;
- cortar cada folha em 6 pedaços;
- identificar cada um dos pedaços de cada folha;
- para cada pedaço adquirir um espectro para obter informação da distribuição angular;

Podemos pensar nesta construção, como uma matriz de pedaços de alumínio com 12 linhas (folhas) e 6 colunas (pedaços). Desta forma, combinando os dois tipos de informação obteríamos resultados que nos permitiriam concluir sobre a distribuição da actividade com o ângulo de emissão e profundidade no alvo.

Este método aqui proposto torna-se impraticável com o sistema de implantação utilizado durante este projecto, uma vez que as folhas de alumínio têm espessuras da ordem de alguns µm e dimensões de 8mm².

É, no entanto, possível obter a informação desejada, tirando conclusões sobre os resultados obtidos na experiência da pilha de folhas de alumínio e numa outra experiência (posteriormente efectuada) que nos permite concluir sobre a forma da distribuição lateral das partículas de ⁷Be.

Capítulo V – Irradiações no ciclotrão

Irradiações e análise dos resultados

Procede-se em seguida a uma descrição das várias irradiações efectuadas para este projecto, assim como à análise dos resultados das mesmas.

- 17/1/2001

O objectivo desta irradiação foi avaliar a eficiência dos atenuadores de alumínio. As características destes atenuadores já foram descritas no capítulo III, no entanto, por uma questão de comodidade, são de novo aqui apresentadas:

Energ.inic. ⁷ Be(MeV)	θ	Espessura de Al (μm)	Energ.fin. ⁷ Be (MeV)
13.65	-16	21.75	0.138
12.67	-6	20.5	0.145
11.25	4	17.25	0.148
9.30	14	13	0.113
6.56	24	7.75	0.150
2.09	34	2	0.158

Tabela 14 – Características do atenuador A

Largura (mm)	Espessura (μm)
8	2
6.67	5
6.67	0.75
5.33	0.75
5.33	1.5
5.33	3
4	0.75
4	1.5
4	2
2.67	1.5
2.67	2
1.33	0.75

Tabela 15 – Projecto do atenuador A

Energ.inic. ⁷ Be(MeV)	θ	Espessura de Al (μm)	Energ.fin. ⁷ Be (MeV)
13.65	-16	20	1.42
12.67	-6	19	1.20
11.25	4	15.5	1.39
9.30	14	11.5	1.21
6.56	24	6	1.44
2.09	34	0.75	1.20

Tabela 16 – Características do atenuador R

Largura (mm)	Espessura (μm)
8.00	0.75
6.67	0.75
6.67	1.5
6.67	3
5.33	4
5.33	1.5
4.00	2
4.00	2
2.67	1.5
2.67	2.
1.33	1.5

Tabela 17 – Projecto do atenuador R

Como alvo, foram utilizados dois pedaços de alumínio com uma espessura de 2mm. Uma vez que foram utilizados dois tipos de atenuadores, e os suportes para alvos têm a designação de A e R, é possível a identificação dos alvos, conforme o tipo de atenuadores que tinham à sua frente. Esta designação foi utilizada durante todo o projecto.

Após a colocação dos alvos finais no suporte, este foi alinhado com a linha de feixe, através de pontos de referência existentes no prato giratório (onde o suporte é colocado) no interior da câmara. Foi criado um grau aceitável de vácuo no interior da câmara. É necessário certificar que o feixe atingirá o colimador de tântalo passando através orifício, atrás do qual se encontra o alvo primário de carbono. Para tal, utiliza-se uma mira que se encontra alinhada com o alvo e um sistema de vídeo que permite monitorizar as características do feixe assim como o seu local de incidência, a partir da sala de comando do ciclotrão. É nesta sala que se comanda a produção do feixe, a sua energia, o diâmetro e outros parâmetros relacionados com o feixe. A focagem do mesmo é feita através de focagem óptica com electroimãs.

No início, foram encontrados alguns problemas de ordem técnica que não nos permitiram obter a corrente de feixe desejada ($2\mu\text{A}$). Começámos a irradiação com cerca de $0.5\mu\text{A}$, obtendo-se no final uma corrente média aproximada de $1\mu\text{A}$. Os alvos foram irradiados durante cerca de oito horas. No visor do integrador de corrente, a carga total depositada indicava o valor $Q=0.029\text{C}$ para uma corrente média de irradiação $I=1\mu\text{A}$.

Após recolhermos os alvos do interior da câmara de dispersão, procedeu-se à sua análise espectroscópica. Para tal usou-se um detector de germânio arrefecido com azoto, de forma a reduzir o ruído electrónico. Uma vez que os espectros adquiridos para as diferentes amostras têm aproximadamente a mesma forma, mostram-se nas seguintes figuras, como exemplo, apenas dois dos espectros obtidos:

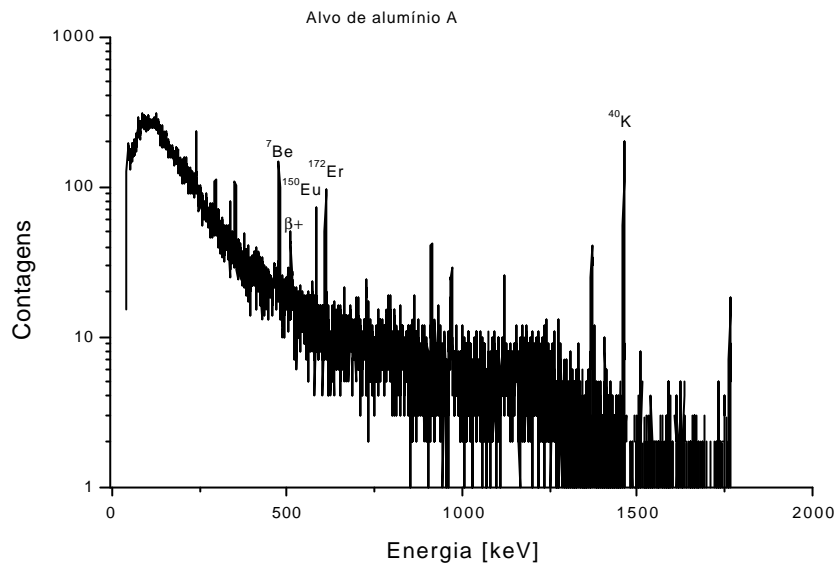


Fig. 21 – Espectro para o alvo A

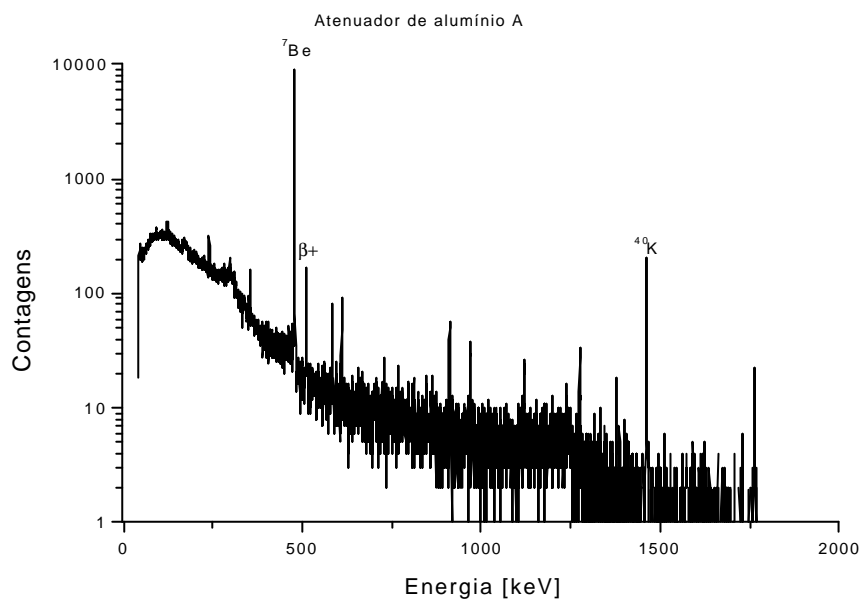


Fig. 22 – Espectro para o atenuador A

O primeiro atenuador (mais fino) foi colocado juntamente com o alvo de alumínio no suporte designado por R. O segundo (mais espesso) foi colocado, juntamente com o seu alvo no suporte A. Esta designação foi utilizada para a obtenção e análise dos espectros.

Nos espectros, para além de encontrarmos picos ${}^7\text{Be}$, encontram-se também outros elementos, não necessariamente presentes na amostra, mas que poderiam ter estado presentes no laboratório quando os espectros foram adquiridos. Podemos por exemplo, encontrar ${}^{150}\text{Eu}$, ${}^{24}\text{Na}$, ${}^{46}\text{Sc}$, ${}^{149}\text{Tb}$, ${}^{172}\text{Er}$.

Não foi adquirido um espectro de fundo pois apenas estávamos interessados no isótopo ${}^7\text{Be}$.

Para o alvo de alumínio A, os picos mais significativos são ^{40}K e ^7Be . A área total das contagens de ^7Be é de $A=526$ contagens.

Para o atenuador de alumínio A, temos $A=28702$ contagens. Podemos avaliar o coeficiente de transmissão dos atenuadores. Neste caso, foi de :

$$\xi=526/(28702+526)=1.8\%$$

No caso do alvo de alumínio R, temos uma área total de $A=2204$ contagens, e para o atenuador de alumínio temos $A=24955$ contagens. Vemos portanto que o coeficiente de transmissão para o atenuador R é de:

$$\xi=2204/(24955+2204)=8.1\%$$

Para a folha de carbono utilizada para parar o feixe e produzir uma quantidade extra de ^7Be , temos uma área total de 150050 contagens.

Para calcular a actividade induzida nestas amostras amostras, foi utilizada a expressão (2) apresentada previamente:

Alvo A:

$$A=526/600 \times 2/[1-1/(10)^{1/2}] \times 0.403^{-1} \times 10 = 63.6\text{Bq}$$

Atenuador A:

$$A=3.47\text{kBq}$$

Alvo R:

$$A=266.6\text{Bq}$$

Atenuador R:

$$A=3.02\text{kBq}$$

Folha de carbono (devido ao facto de esta apresentar uma grande actividade, tomou-se $d=16\text{cm}$ e usou-se a mesma expressão acima indicada):

$$A= 721.7\text{kBq}$$

Podemos então concluir, a partir dos coeficientes de transmissão que os atenuadores de alumínio projectados não têm o comportamento que inicialmente foi previsto pelas simulações do TRIM, uma vez que apenas uma quantidade inferior a 10% das partículas de ^7Be consegue atravessar os atenuadores. Isto é um indicador que, em média, as partículas perdem mais energia do que aquela prevista pelo TRIM. Assim, pensei em diminuir a espessura dos atenuadores de forma que mais partículas consigam atravessar os atenuadores. Posteriormente concluí que estes valores se devem ao facto de ter sido efectuada a extrapolação, citada no capítulo III, o que contribuiu para um projecto incorrecto dos atenuadores.

No que diz respeito à folha de carbono, foi possível obter uma grande quantidade de ^7Be no seu interior. Esta folha de carbono é adequada para parar o feixe de ^3He , uma vez que um feixe deste tipo, com uma energia de 23MeV tem

um alcance máximo de 0.28mm em carbono. Assim, temos a certeza que todas as partículas formadas, permanecem no interior da folha de carbono uma vez que esta tem uma espessura de 0.5mm. Este berílio assim produzido será útil, por exemplo, para as experiências de difusão em carboneto de silício, evaporando o ^7Be da folha de carbono através da passagem de uma corrente elevada, calibração de detectores para experiências com positrões, e testes de implantação com o separador de isótopos.

- **18/1/2001**

Nesta segunda irradiação, não foram utilizados alvos de alumínio, apenas uma folha de carbono, com o objectivo de produzir mais ^7Be e utilizar todo o tempo de feixe que nos foi atribuído. Esta irradiação teve uma duração de aproximadamente oito horas, tendo sido utilizada uma corrente média de $1.5\mu\text{A}$ e depositada uma carga total de $Q=0.0438\text{C}$.

Mais uma vez adquirimos o espectro, por forma a quantificar o ^7Be produzido:

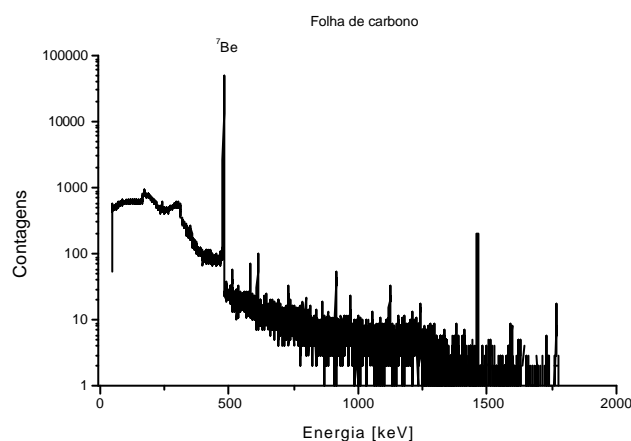


Fig. 23 – Espectro da folha de carbono irradiada

Neste espectro, encontramos essencialmente contagens devidas ao ^7Be , nomeadamente 49835 contagens de pico, cuja área total é de $A=156681$ contagens. A actividade desta amostra é de:

$$A=753.6\text{kBq}$$

- **19/1/2001**

Para esta irradiação, foram projectados novos atenuadores de alumínio, com o objectivo de permitir que mais partículas de ^7Be cheguem ao alvo. Para tal, a espessura dos atenuadores foi reduzida ligeiramente. Assim, as partículas terão agora uma energia de 2.3MeV e 400keV (segundo as simulações), no entanto, como já se pode constatar, estas energias serão na realidade mais reduzidas, próximo das energias que nos interessa obter.

Os novos atenuadores têm as seguintes características:

Energ.inic. ⁷ Be(MeV)	θ	Espessura de Al (μm)	Energ.fin. ⁷ Be (MeV)
13.65	-16	21.4	0.310
12.67	-6	20	0.423
11.25	4	16.8	0.385
9.30	14	12.4	0.433
6.56	24	7.4	0.320
2.09	34	1.6	0.400

Tabela 18 – Características do atenuador A utilizado nesta irradiação

Largura (mm)	Espessura (μm)
8	1.5
6.67	0.8
6.67	5
5.33	5
4	1.5
4	0.8
4	2
2.67	3
1.33	1.5

Tabela 19 – Projecto do atenuador A

Energ.inic. ⁷ Be(MeV)	θ	Espessura de Al (μm)	Energ.fin. ⁷ Be (MeV)
13.65	-16	19	2.2
12.67	-6	17.5	2.3
11.25	4	14	2.5
9.30	14	10	2.3
6.56	24	5	2.2
2.09	34	0	1.8

Tabela 20 – Características do atenuador R

Largura (mm)	Espessura (μm)
6.67	5
5.33	5
4	2
4	2
2.67	2
2.67	1.5
1.33	1.5

Tabela 21 – Projecto do atenuador R

Assim, para estes atenuadores, irradiando as amostras durante um período de 8h, com uma corrente média de cerca de $2.3\mu\text{A}$ (carga total depositada $Q = 0.0677\text{C}$) obtiveram-se os seguintes espectros:

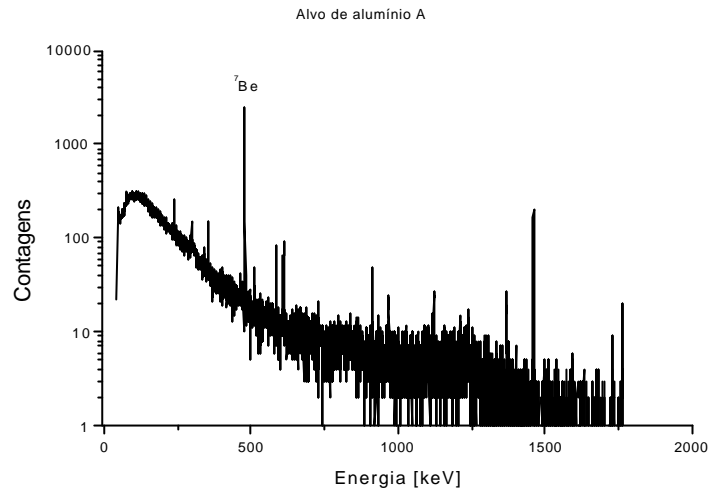


Fig. 24 – Espectro do alvo de alumínio A após a irradiação

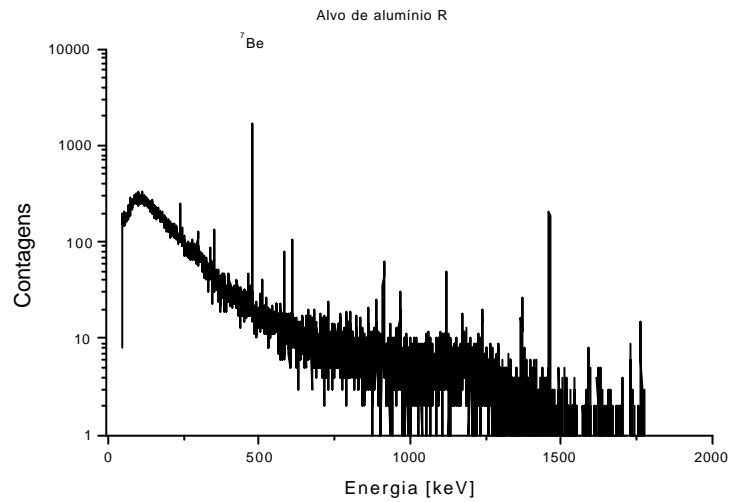


Fig. 25 – Espectro do alvo de alumínio R após a irradiação

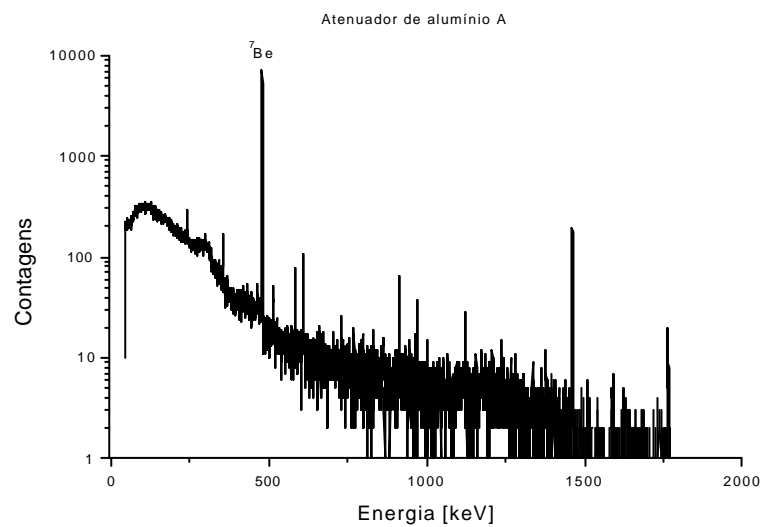


Fig. 26 – Espectro do atenuador de alumínio A após a irradiação

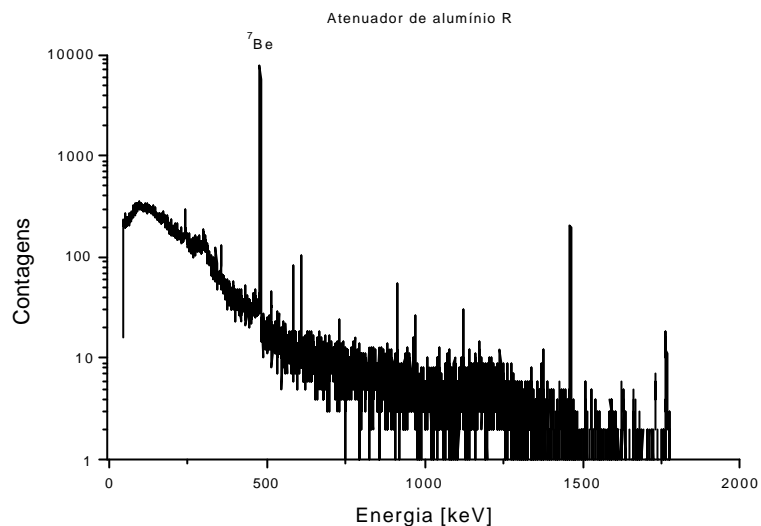


Fig. 27 – Espectro do atenuador de alumínio R após a irradiação

Para além da análise que se fez aos atenuadores, aos alvos e à folha de carbono, foi também feita uma análise aos suportes de alvos.

Assim, para o alvo R temos uma área total de $A=5370$ contagens, para o respectivo atenuador R temos uma área do pico $A=24379$ contagens. Assim, o coeficiente de transmissão é de:

$$\xi = 5370 / (24379 + 5370) = 18\%$$

Para o alvo A, temos uma área de pico total $A=7552$, e para o atenuador A temos $A=23187$, logo

$$\xi = 7552 / (23187 + 7552) = 24.56\%$$

Na folha de carbono temos um total de 235713 contagens, no suporte R temos 52047 contagens e no suporte A temos um total de 65122 contagens de ${}^7\text{Be}$.

As actividades dos vários elementos são:

Elemento	Actividade [kBq]
Alvo R ($d=1\text{cm}$, $t_{\text{aq}}=10\text{min}$)	0.65
Atenuador R	2.95
Alvo A	0.914
Atenuador A	2.8
Folha de carbono ($d=16\text{cm}$)	1133
Suporte R	6.3
Suporte A	7.88

Tabela 22 – Actividade dos elementos irradiados nesta experiência

Concluimos a partir destes resultados que apesar de os coeficientes de transmissão terem melhorado substancialmente, ainda se verifica que uma grande quantidade de ${}^7\text{Be}$ fica retida nos atenuadores. Por este facto pensou-se em reduzir de novo a espessura dos atenuadores. Novamente vemos o efeito da extrapolação efectuada.

- 19/1/2001

Nesta segunda irradiação do dia 19, que teve início às 16h, foi utilizada uma quarta folha de carbono. O ciclotrão é parado à meia noite de sexta-feira, altura em que esta irradiação terminou. Na manhã do dia 22, a amostra foi retirada para análise. Foi utilizada uma corrente média de aproximadamente $2.5\mu\text{A}$, e a leitura no integrador de corrente, da carga total depositada foi de $Q=0.0769\text{C}$. Obteve-se o seguinte espectro:

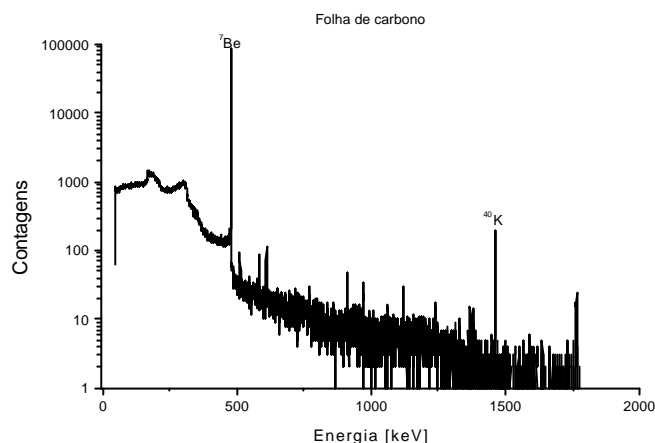


Fig. 28 – Espectro da folha de carbono irradiada

O número total de contagens de ${}^7\text{Be}$ é de área= 274777 contagens, logo a actividade desta amostra é de ($d=16\text{cm}$, $t_{\text{aq}}=600\text{s}$):

$$A=1.32\text{MBq}$$

- 30/1/2001

Para esta irradiação, utilizaram-se coberturas de alumínio para os suportes de amostras de forma a que estes não sejam contaminados, quando se procede à irradiação. A largura destas coberturas foi escolhida de forma a que se possa investigar a quantidade de ${}^7\text{Be}$ produzida em ângulos superiores a 60° em relação à normal do feixe de ${}^3\text{He}$. Na seguinte figura, encontra-se esquematizada esta situação:

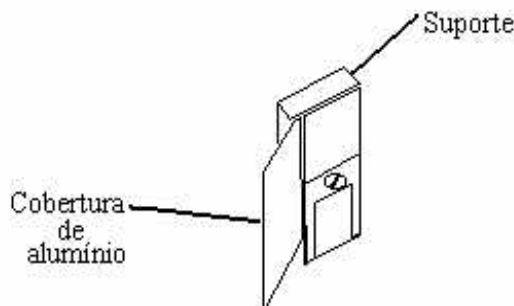


Fig. 29 – Suporte de amostras com cobertura de alumínio

Nesta irradiação utilizámos amostras de SiC enviadas pela associação Lehrstuhl Angewandte Physik da Universidade de Erlangen-Nürnberg. As duas amostras tinham dopagens diferentes, uma tipo n e outra tipo p, como se deduz a partir das suas designações:

R: 4Hp – AF0161-05

A: 4Hn – R0411 -03

em que R e A se referem ao suporte de amostras onde serão colocadas na câmara de dispersão.

Para esta irradiação foi usado um feixe com uma corrente de $1.5\mu\text{A}$.

A irradiação iniciou-se no dia 30 por volta das 14h e terminou no dia 31 por volta das 11h. A carga total depositada foi de $Q = 0.113\text{C}$. Após a irradiação, foram adquiridos os seguintes espectros:

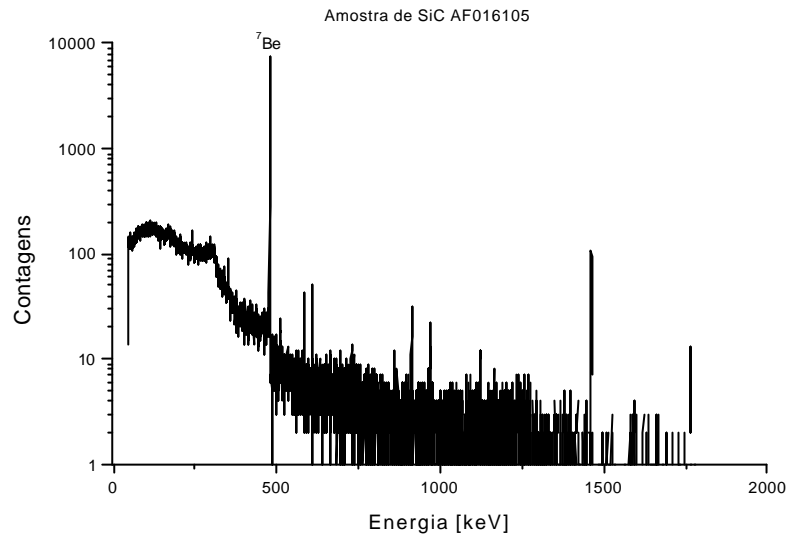


Fig. 29 – Espectro da amostra AF016105

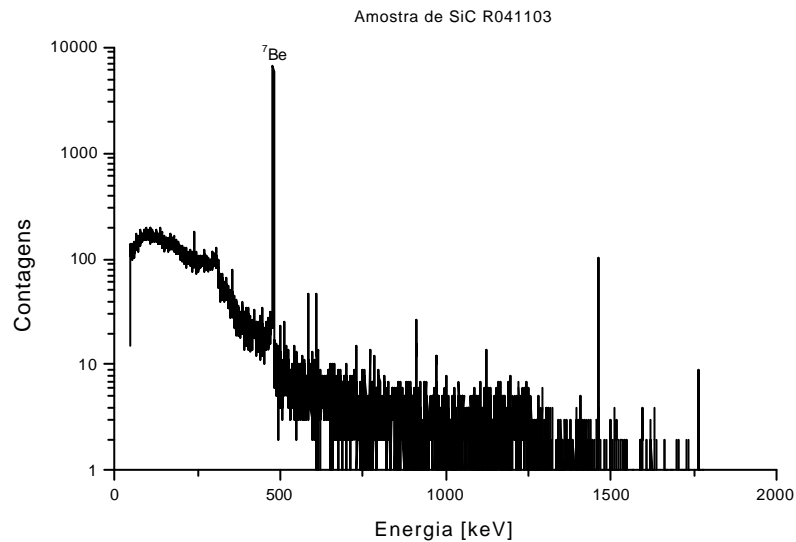


Fig. 30 – Espectro da amostra R041103

Considerando ainda que a distância fonte-detector é de 1cm e que o tempo de aquisição é de 5 minutos, então a actividade destas amostras é:

R041103: $A = 5.38 \text{ kBq}$

AF016105: $A = 6.223 \text{ kBq}$

Apesar de, por lapso, não ter sido adquirido um espectro para a folha de carbono utilizada para parar o feixe, durante esta irradiação, é possível extrapolar a partir de condições anteriores, a actividade da folha de carbono. Como resultado obtém-se $A = 2.1\text{MBq}$

A partir dos dados acima indicados, podemos estimar a quantidade de ${}^7\text{Be}$ implantada em cada amostra. Sabemos que $t_{1/2} = (\ln 2)/\lambda$, logo temos no caso do ${}^7\text{Be}$, $\lambda = 1.5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Assim sendo, como $A = -\lambda N$, a partir da actividade e da constante de decaimento, é possível determinar aproximadamente a quantidade de partículas implantadas. Portanto, no caso destas duas amostras, temos:

$$\text{R041103: } N = 3.5575 \times 10^{10} \text{ partículas de } {}^7\text{Be}$$

$$\text{AF016105: } N = 4.11 \times 10^{10} \text{ partículas de } {}^7\text{Be}$$

Estas amostras foram de novo enviadas para Erlangen, onde posteriormente foram efectuados estudos de DLTS (espectroscopia transiente de níveis profundos). No entanto, quando escrevi este relatório de estágio, não me tinham sido fornecidos dados sobre os resultados da implantação nestas amostras.

- 1/2/2001

Para esta irradiação usámos como alvos, outras duas amostras da mesma Universidade, nomeadamente, as amostras n-AD0512-04 e p-CU0027-11. A intensidade da corrente deste feixe foi de $2\mu\text{A}$. O tempo de irradiação foi aumentado para cerca de 55h, uma vez que era desejável depositar uma maior quantidade de carga nestas amostras. A carga total depositada durante esta irradiação, foi de $Q = 0.397\text{C}$. Como exemplo de um espectro resultante desta irradiação, mostra-se o espectro obtido com a amostra CU002711, sendo o outro espectro idêntico ao apresentado:

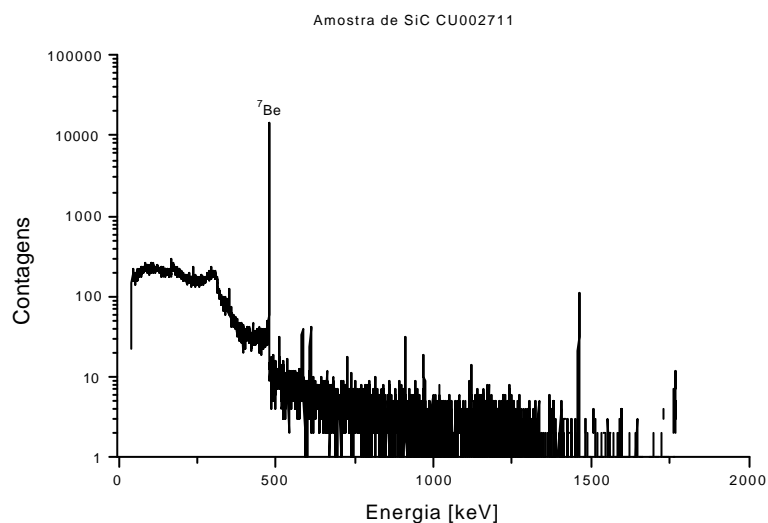


Fig. 31 – Espectro da amostra CU002711

A actividade induzida e a quantidade de ^7Be implantada nestas amostras é de:

$$\text{AD0512-04: } A = 11.8\text{KBq} \quad N = 7.8 \times 10^{10} \text{ partículas}$$

$$\text{CU0027-11: } A = 12.1\text{KBq} \quad N = 8.02 \times 10^{10} \text{ partículas.}$$

De novo, podemos estimar a actividade da folha de carbono utilizada nesta irradiação. Obtém-se uma actividade de cerca de $A = 7.3\text{MBq}$

Devido ao facto de terem sido utilizados protectores de alumínio para os suportes de amostras, com a configuração acima indicada, foi possível verificar a quantidade de ^7Be produzida em ângulos superiores a 60° e comparar com a quantidade produzida em ângulos inferiores a 60° .

A partir do espectro obtido para o protector R, para ângulos superiores a 60° , temos um total de 649 contagens para o pico de Be, sendo esse mesmo número para o caso de ângulos inferiores a 60° , igual a 47216 contagens. Assim, fazendo o quociente entre as partículas emitidas em ângulos superiores a 60° e o número total de partículas:

$$\eta = 649/47865 = 1.35\%$$

No caso do protector A, temos para ângulos superiores a 60° , um total de 569 contagens, sendo o número de contagens para ângulos inferiores a 60° , 39360 contagens, logo a mesma razão é de:

$$\eta = 569/39929 = 1.42\%$$

Conclui-se assim que, a quantidade de partículas emitidas segundo ângulos maiores que 60° (em relação à normal do feixe incidente de ^3He) é inferior a 1.5% e portanto podemos ignorar essa quantidade.

- 15/3/2001

Com esta irradiação, pretendia-se efectuar testes adicionais sobre o comportamento dos atenuadores de alumínio. Estes atenuadores têm as seguintes características:

Energ.inic. ^7Be (MeV)	θ	Espessura de Al (μm)	Energ.fin. ^7Be (MeV)
13.65	-16	19	2.2
12.67	-6	17.5	2.3
11.25	4	14	2.5
9.30	14	10	2.3
6.56	24	5	2.2
2.1	34	0	2.1

Tabela 23 – Características do atenuador A

Energ.inic. ⁷ Be(MeV)	θ	Espessura de Al (μm)	Energ.fin. ⁷ Be (MeV)
13.65	-16	18	3
12.67	-6	18	2
11.25	4	12	4
9.30	14	12	0.7
6.56	24	5	2.2
2.1	34	0	2.1

Tabela 24 – Características do atenuador R

Esta irradiação durou cerca de 3h, com uma corrente média de $I = 0.5\mu\text{A}$, sendo a carga total depositada $Q = 0.00608\text{C}$.

Apresentam-se, como exemplo, os espectros obtidos para o atenuador R e para o alvo R:

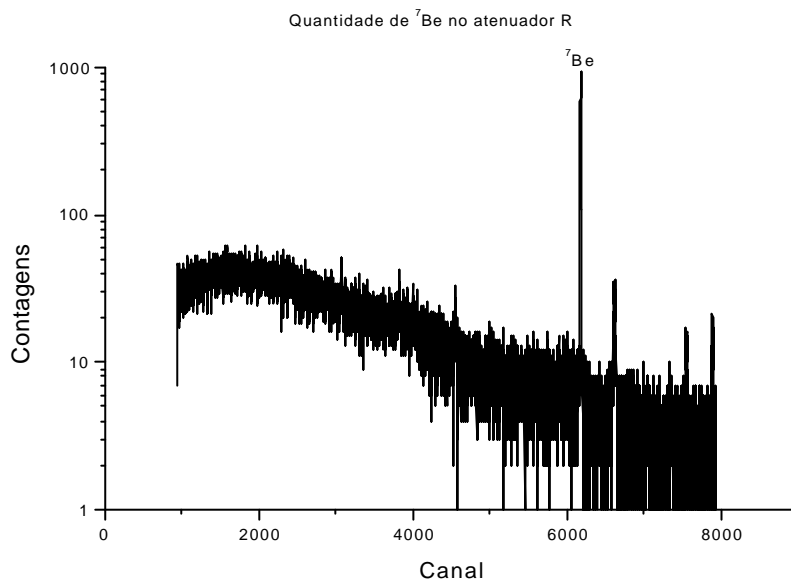


Fig. 32 – Espectro para o atenuador R

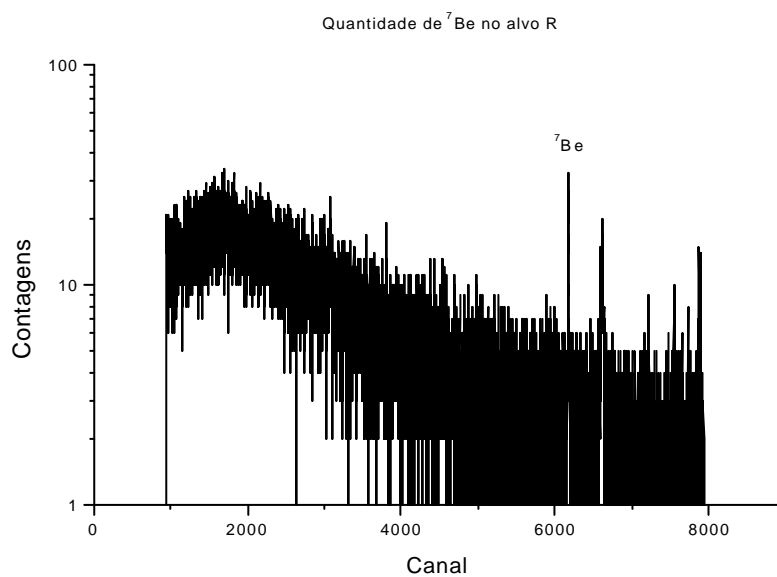


Fig. 33 – Espectro para o Alvo R

A actividade de cada um dos elementos é:

Atenuador R: $A = 1.3\text{kBq}$

Alvo R: $A = 56\text{Bq}$

Atenuador A: $A = 1.4\text{kBq}$

Alvo A: $A = 13.6\text{Bq}$

Devido à pequena actividade induzida nos alvos, parcialmente pelo facto de a corrente utilizada ter sido reduzida e o tempo de irradiação bastante curto, não foi possível efectuar a análise que se pretendia, sobre a eficiência dos atenuadores.

Posteriormente chegou-se à conclusão sobre a forma como as partículas se distribuem lateralmente ao longo do alvo (conforme o ângulo de emissão). Para se efectuar um estudo sobre a distribuição das partículas conforme o ângulo de emissão e a profundidade no alvo (dependente da energia que possuem), é necessário combinar o método da pilha de folhas (que permite analisar em profundidade) com uma análise da distribuição angular (dividindo o alvo em 6 pedaços, correspondendo cada um deles a um ângulo de emissão), tal como foi descrito anteriormente no capítulo IV.

Neste dia, procedeu-se também a uma segunda experiência, utilizando o método da pilha de folhas. Tal como foi descrito no capítulo IV, foi utilizada uma pilha de 12 folhas de alumínio, cada uma com $2\mu\text{m}$ de espessura, para se estudar o perfil de profundidade das partículas de ${}^7\text{Be}$. A corrente do feixe teve uma intensidade média de $0.5\mu\text{A}$, durante cerca de 6h de irradiação, sendo depositada uma carga total de 0.0109C . A folha de carbono utilizada para parar o feixe durante esta experiência e a anterior, tem uma actividade estimada de 298kBq .

- **20/3/2001**

Para esta irradiação, não foram utilizados os atenuadores de alumínio, uma vez que o seu comportamento em relação à atenuação das partículas não é bem conhecido, e pretendia-se implantar o maior número possível de partículas de ${}^7\text{Be}$ na amostra. Assim sendo, foram utilizadas duas amostras de GaN fornecidas pelo grupo de física do estado sólido da Universidade de Ulm. Foi também utilizada uma amostra de GaN que me foi cedida por um elemento do meu grupo de trabalho.

Uma das amostras de Ulm foi colocada na câmara de dispersão (suporte A), juntamente com a nossa amostra (suporte R). A irradiação iniciou-se às 8h dia 20, sendo o feixe parado às 16h do dia 22. No visor do integrador de corrente foi possível obter o valor $Q = 0.326\text{C}$ para a carga depositada. Após isto, a nossa amostra de GaN foi retirada e foi colocada uma segunda amostra de Ulm, uma vez que se pretendia obter uma das amostras de Ulm com maior actividade que a outra. Esta segunda irradiação iniciou-se no dia 22 às 16h30m e foi parada às 24h do dia 23. Obteve-se uma leitura de $Q = 0.189\text{C}$. Em ambas as irradiações, o feixe utilizado possuía uma corrente de $1.6\mu\text{A}$. Uma vez mais foi utilizada uma folha de carbono para parar o feixe de ${}^3\text{He}$ e produzir mais ${}^7\text{Be}$.

Esta folha de carbono foi posteriormente entregue ao grupo do separador de isótopos, para ser usada como fonte de ${}^7\text{Be}$ para testes de implantação.

Assim, para cada uma das amostras de ^7Be obtivemos os respectivos espectros:

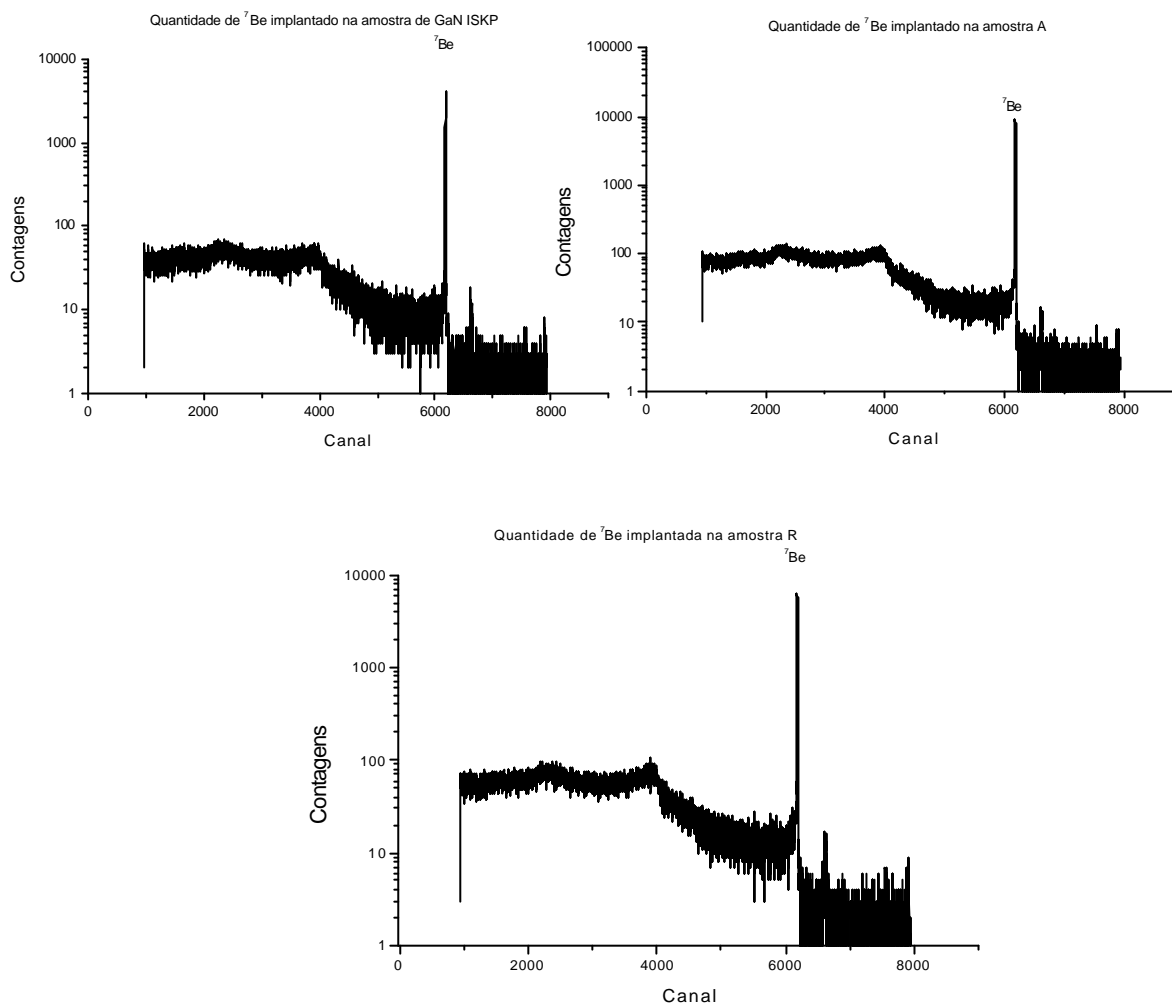


Fig. 34 – Espectros das amostras implantadas nesta experiência

Estes espectros foram adquiridos após se ter feito um recozimento (annealing) na RTA (rapid thermal annealing) a cerca de 900°C durante dois minutos. As actividades e quantidades de berílio implantado são as seguintes:

Amostra A: $A = 40.03\text{kBq}$ $N = 2.64 \times 10^{11}$ partículas de ^7Be

Amostra R: $A = 27.5\text{kBq}$ $N = 1.82 \times 10^{11}$ partículas

Amostra ISKP: $A = 17.63\text{kBq}$ $N = 1.16 \times 10^{11}$ partículas

Quanto à folha de carbono, por lapso não foi obtido o respectivo espectro, no entanto, é possível efectuar uma estimativa da actividade produzida. A actividade estimada para a folha de carbono é de $A = 9.3\text{MBq}$.

- **10/5/2001**

Nesta última irradiação efectuou-se um estudo sobre a distribuição angular das partículas de ^7Be em alvos de alumínio. A irradiação começou às 8h do dia 9 de

Maio e foi parada no dia 10 de Maio às 14h. Nesta irradiação o feixe tinha uma corrente média de 300nA e no final da irradiação obteve-se uma carga total depositada de $Q = 0.028C$.

Após a irradiação, a actividade dos alvos foi medida. No alvo A obtiveram-se 10181 contagens de pico (7Be), enquanto que no alvo R obtiveram-se 10190 contagens de pico. Após isto, cada um dos alvos foi cortado em seis pedaços de dimensões desejavelmente idênticas, os quais foram identificados de acordo com a sua distância em relação ao feixe de 3He , como se representa no seguinte esquema:

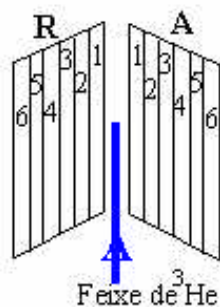


Fig. 35 – Esquema dos alvos utilizados para investigar a distribuição lateral das partículas implantadas

Durante a fase de medição da actividade das amostras, verifiquei que um dos suportes de amostras se encontrava extremamente activo, em comparação com o outro. Esta situação está relacionado com um mau alinhamento do feixe em relação ao alvo. De facto, durante uma primeira fase de preparação e afinamento do feixe, em que se procede à sua focagem e alinhamento do mesmo, um dos operadores do ciclotrão por lapso alinhou de forma incorrecta o feixe com o alvo onde este deveria incidir. Consequentemente, o feixe de 3He terá incidido num dos suportes causando a actividade verificada.

Para cada um dos pedaços A (A1,A2,...,A6) e R (R1,...,R6) obteve-se o respectivo espectro. Apresentam-se na seguinte figura, dois dos espectros, nomeadamente para os pedaços A1 e A6:

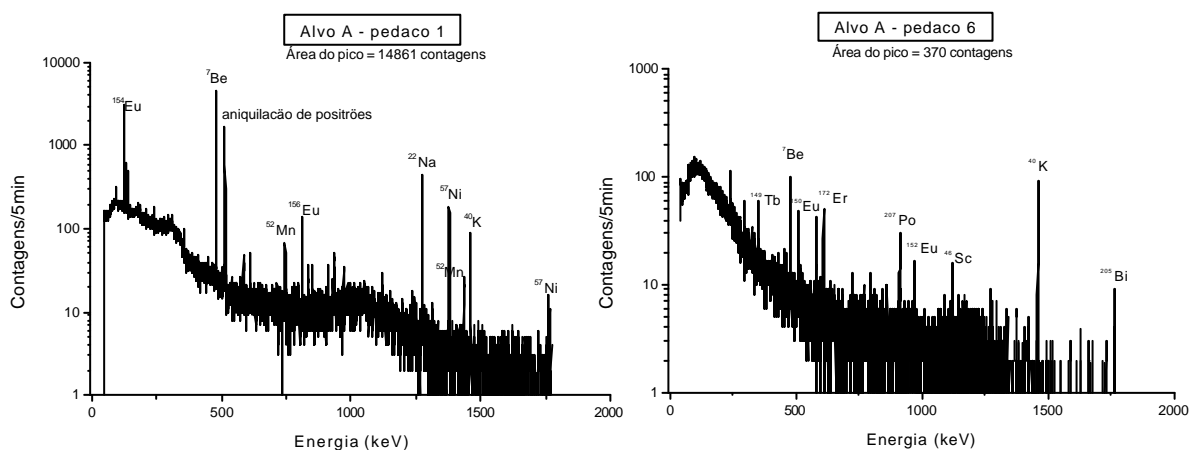


Fig. 36 – Espectros dos pedaços de alumínio para 10° e 60°

Quanto à actividade dos vários elementos, obtiveram-se os seguintes resultados:

Elemento	Actividade [kBq]
A1	3.59
A2	1.91
A3	0.98
A4	0.57
A5	0.19
A6	0.089
R1	3.2
R2	1.77
R3	1.32
R4	0.607
R5	0.234
R6	0.043
Folha de carbono	675

Tabela 25 – Actividade dos vários elementos irradiados

Assim sendo, com estes dados podemos verificar o comportamento de actividade v.s. ângulo para cada um dos alvos e tirar conclusões sobre a distribuição angular das partículas de ^7Be neste processo de implantação:

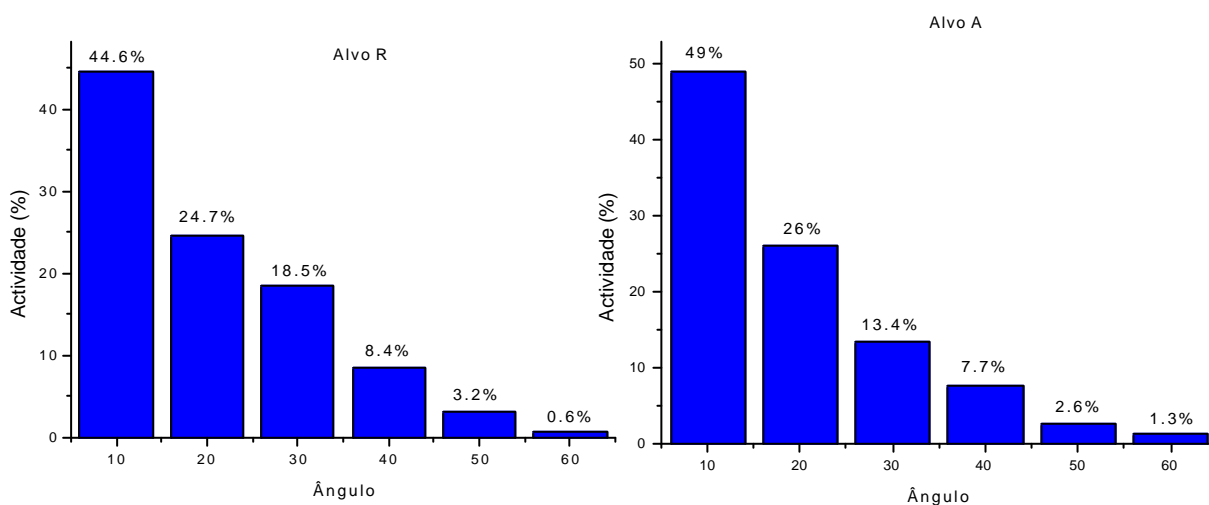


Fig. 37 – Distribuição lateral da actividade

É possível concluir a partir destes gráficos que a grande maioria das partículas são emitidas segundo ângulos entre 0° e 20° .

Capítulo VI – Evaporação de ^7Be das folhas de carbono

Experiências de evaporação

Estas experiências têm como objectivo o aproveitamento do ^7Be produzido nas folhas de carbono que foram utilizadas para parar o feixe de ^3He . Uma vez que desta forma é possível produzir uma grande quantidade de partículas de ^7Be , nomeadamente, na ordem de 10^{12} - 10^{13} partículas, pensámos em efectuar um estudo sobre a possibilidade de evaporar o berílio assim produzido e fazer a sua implantação directa em amostras de SiC.

O procedimento experimental para este processo consiste em fazer passar uma corrente elevada através da folha de carbono, fazendo com que a temperatura da mesma aumente e ocorra a evaporação de ^7Be . Para estas experiências, foi utilizada uma câmara de vácuo no interior da qual existem dois eléctrodos. A folha de carbono deve ser colocada entre os eléctrodos, de forma a que uma corrente elevada possa passar através dela. Por cima da folha de carbono é então colocada a amostra na qual se pretende difundir as partículas de ^7Be .

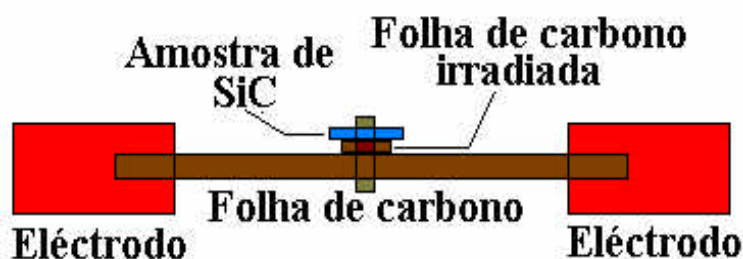


Fig. 38 – Esquema da experiência de evaporação de Be^7

Devido ao facto de as folhas de carbono terem sido todas armazenadas no mesmo contentor de chumbo sem serem previamente identificadas, foi efectuada uma medida da dose ao contacto. Assim, temos as seguintes amostras com a respectiva dose:

Folha de Carbono	Dose (mrad/h)
A	85
B	10
C	22
D	19
E	12
F	45

Tabela 26 – Doses das folhas de carbono irradiadas

Para o primeiro teste de evaporação de berílio, foi utilizada a folha de carbono menos activa, nomeadamente a folha B. Esta foi colocada na câmara de evaporação, isto é, na câmara de vácuo contendo os dois eléctrodos que serão utilizados para fazer passar a corrente através da folha de carbono. Através de fontes bibliográficas^{III} tomámos conhecimento que, para evaporar ^7Be da nossa folha de carbono teríamos que a aquecer a uma temperatura aproximada de 1200°C .

Para medir a temperatura a que a folha se encontra, foi utilizado um pirómetro óptico. O pirómetro tem um filtro e um filamento que é utilizado para ajustar a sua escala. Quando a cor do filamento é igual à cor que a amostra possui (indicador da temperatura a que se encontra), a temperatura lida no pirómetro é a temperatura a que a amostra se encontra.

Após a amostra B ter sido colocada na câmara, foi-lhe aplicada uma corrente. A amostra começou a brilhar devido ao aumento da sua temperatura. Devido ao facto de a janela de vidro existente na câmara estar manchada, com um outro elemento com origem em evaporações anteriores, a medição da temperatura com o pirómetro não permitiu obter resultados muito precisos. Por este motivo, quando foi aplicada a máxima corrente disponível (150A), a folha de carbono partiu-se em dois pedaços. No topo da folha de carbono, havia sido colocada uma folha de alumínio que serviria de alvo para as partículas evaporadas. Posteriormente foram efectuadas medições mais precisas à folha de carbono, aos eléctrodos da câmara e à folha de alumínio. Obtiveram-se os seguintes resultados:

Folha de carbono B: $A = 1.14\text{kBq}$

Eléctrodos: $A = 12.25\text{kBq}$

Folha de alumínio: $A = 2.7\text{kBq}$

Estes resultados indicam-nos que de facto ocorreu a evaporação de berílio, apesar de não ter sido possível controlar a forma como esta se processou.

Numa segunda tentativa de verificar a temperatura de evaporação de berílio da folha de carbono, foi tentada uma nova aproximação. A parte activa da folha de carbono foi colocada no interior de um tubo de quartzo, sendo posteriormente evacuada e o tubo selado, de forma a otimizar a eventual evaporação de berílio. O tubo foi então colocado no interior de um forno electricamente controlado, com a extremidade contendo a folha de carbono no centro do forno e a outra extremidade no exterior do forno. O objectivo era obter uma condensação de Be na extremidade fria do tubo, e poder verificar a que temperatura se inicia a evaporação. Para tal foi colocado um detector sobre a extremidade fria do tubo de quartzo.

Para esta experiência foi utilizada a folha de carbono E, indicada na tabela acima. A experiência iniciou-se com uma temperatura de 700°C , que foi mantida durante cerca de três horas. O detector indicou uma taxa de contagem de 15 contagens/s. A temperatura foi aumentada em mais 100° e mantida durante mais duas horas. No fim o detector indicava uma taxa de contagem de aproximadamente 15 contagens/s. Procedeu-se desta forma até se obter uma temperatura de 1000°C e ao fim de cerca de duas a taxa de contagem não tinha sofrido uma grande alteração. Não foi possível aumentar mais a temperatura, uma vez que o tubo de quartzo poderia começar a perder a sua rigidez e fundir, podendo-se eventualmente contaminar o forno e material adjacente.

A única conclusão que pode ser retirada desta experiência, é o facto de o ponto de evaporação do berílio das folhas de carbono ser superior a 1000°C . Desta forma, para conhecer com mais precisão este ponto de evaporação, é necessário voltar ao método utilizado anteriormente, efectuando a limpeza da janela da câmara de evaporação e tentar controlar de uma forma mais exacta o processo de evaporação e difusão.

Para se estudar o comportamento de variação da temperatura com a corrente foi utilizada uma folha de carbono não activa, para efectuar testes de medição com o pirómetro.

Num primeiro teste, foi utilizada uma folha de carbono com uma espessura de 2mm, colocada entre os eléctrodos. Uma vez que a corrente máxima que a nossa fonte permite obter é de 150A, é necessário utilizar uma certa espessura da folha de carbono, o que equivale a

dizer, uma certa resistividade, para se obter uma determinada temperatura. Para este primeiro teste, obtiveram-se os seguintes resultados:

Corrente [A]	Erro [\pm A]	Temperatura [$^{\circ}$ C]	Erro [\pm $^{\circ}$ C]
75	2.5	810	2.5
80	2.5	880	2.5
85	2.5	935	2.5
90	2.5	990	2.5
95	2.5	1035	2.5
101	2.5	1075	2.5
106	2.5	1130	2.5
111	2.5	1165	2.5
115	2.5	1200	2.5
120	2.5	1240	2.5

Tabela 27 – Corrente vs. Temperatura medida com o pirómetro

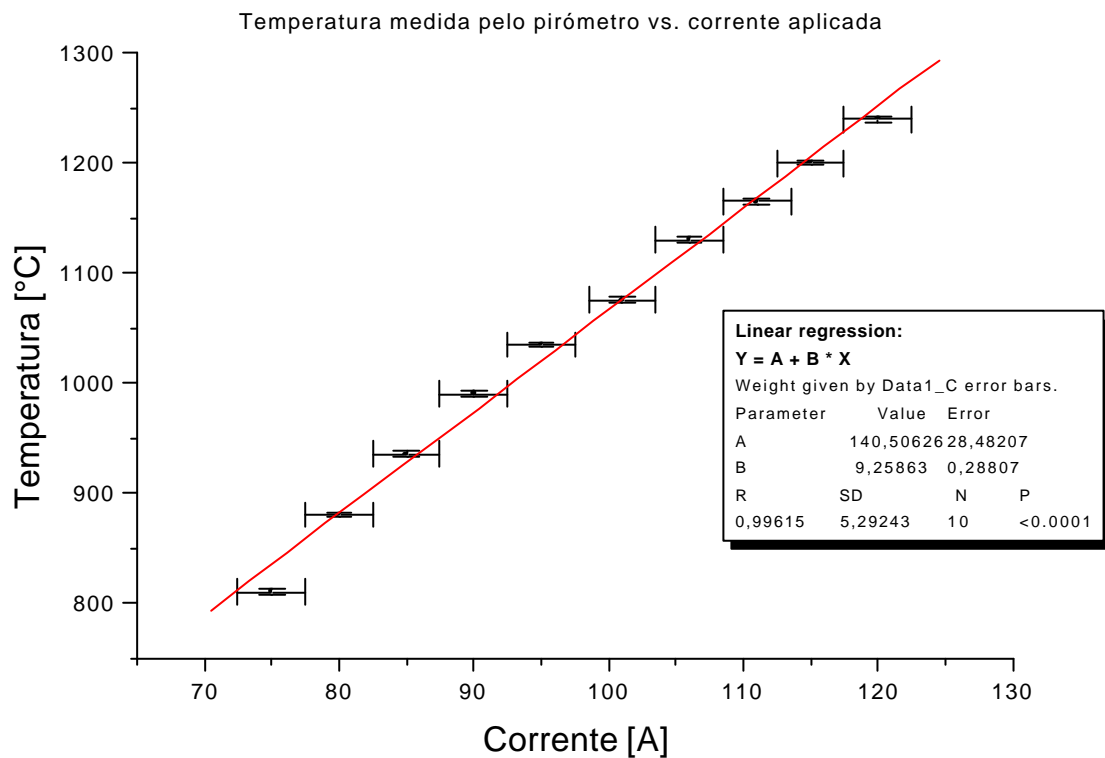


Fig. 39 – Relação linear entre a temperatura medida pelo pirómetro óptico e a corrente aplicada

Com esta configuração e usando a corrente máxima disponibilizada pela fonte (150A), obtemos uma temperatura máxima de cerca de 1530 $^{\circ}$ C, a qual deve ser suficiente para a evaporação do berílio da folha de carbono, mas, de acordo com algumas referências bibliográficas^{III}, não é suficiente para a difusão do berílio em SiC (1800 $^{\circ}$ C).

Assim sendo, é necessário aumentar a temperatura, e para tal pensou-se em reduzir a espessura da folha para metade, diminuindo a condutividade para metade. Considerando que se aumentou a resistividade por um factor de 2, então usando a mesma corrente, a dissipação de potência aumenta também por um factor de 2 e teoricamente podemos alcançar uma temperatura de 2000 $^{\circ}$ C. Desta forma, obtivemos os seguintes resultados:

Corrente [A]	Erro [\pm A]	Temperatura [$^{\circ}$ C]	Erro [\pm $^{\circ}$ C]
51	2.5	880	2.5
56	2.5	970	2.5
60	2.5	1030	2.5
65	2.5	1115	2.5
70	2.5	1170	2.5
75	2.5	1240	2.5
80	2.5	1295	2.5
85	2.5	1320	2.5
90	2.5	1390	2.5
95	2.5	1445	2.5
100	2.5	1490	2.5
105	2.5	1525	2.5
110	2.5	1580	2.5
115	2.5	1630	2.5
120	2.5	1660	2.5
125	2.5	1690	2.5
130	2.5	1730	2.5
135	2.5	1775	2.5
140	2.5	1815	2.5
145	2.5	1845	2.5
150	2.5	1880	2.5

Tabela 28 - Corrente vs. Temperatura medida com o pirômetro para a nova espessura da folha de carbono

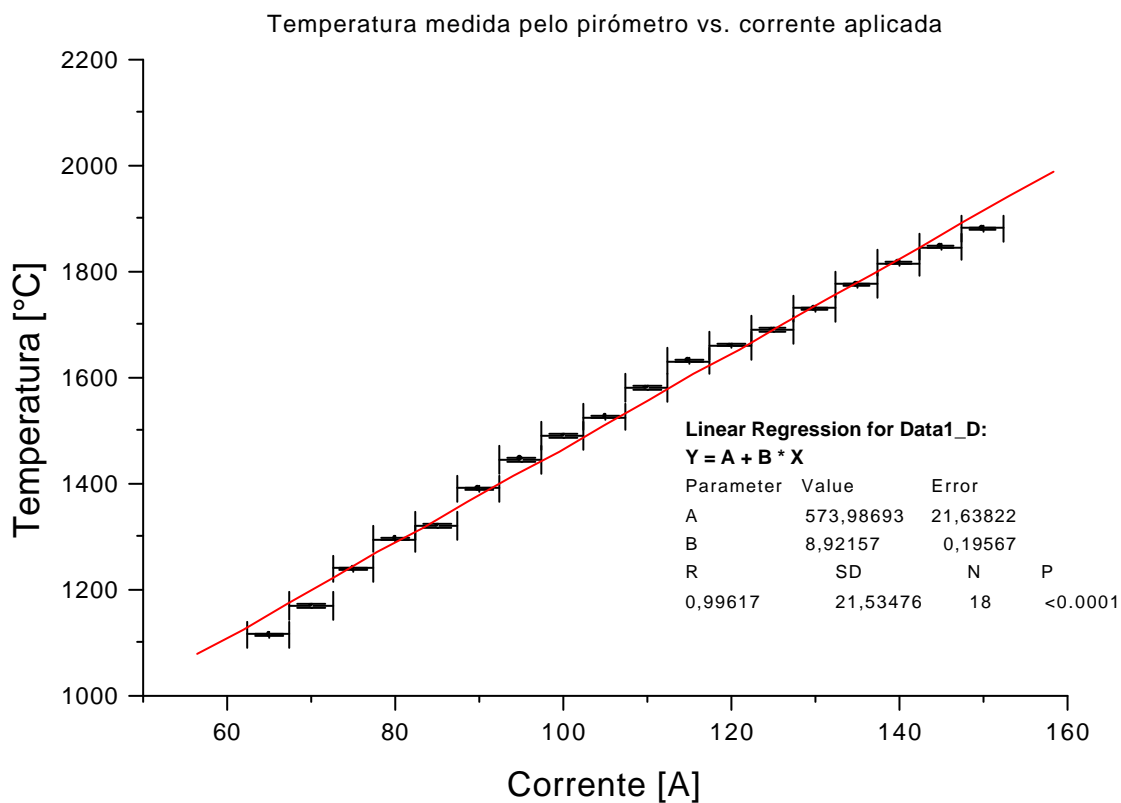


Fig. 40 – Relação linear entre a temperatura medida pelo pirômetro óptico e a corrente aplicada

Vemos assim que, com esta configuração podemos atingir temperaturas da ordem de 1900°C, o que é suficiente para a evaporação e difusão de berílio em SiC.

Foi então efectuada uma experiência de evaporação e difusão de berílio numa amostra de SiC. Uma das folhas de carbono utilizadas para parar o feixe de hélio foi colocada sobre a folha de carbono mais espessa, e sobre a primeira, colocámos a amostra de SiC. Foi utilizado um grampo de tungsténio para fixar o conjunto, impedindo que as amostras caíssem para o interior do sistema de vácuo. A câmara foi evacuada, obtendo-se uma pressão interna da ordem de 10^{-5} mbar. Fez-se passar uma corrente de aproximadamente 140A, obtendo-se uma temperatura de 1823°C. No entanto, devido às perdas que ocorrem no interior da câmara, nomeadamente dissipação de calor e outros factores, pensamos que a temperatura que é medida pelo pirómetro é inferior à que realmente o conjunto se encontra, e portanto podemos considerar que foi obtida uma temperatura superior a 1900°C. Após termos mantido as condições de difusão durante cerca de 20 minutos, foi efectuada uma análise espectroscópica da amostra de SiC, e da folha de carbono. Esta análise revelou que, ocorreu a evaporação de berílio da folha de carbono, no entanto não foram detectados indícios de que a difusão foi bem sucedida. Pensamos que este facto se deve ao grande volume existente na câmara de difusão, para as partículas de berílio, diminuindo a probabilidade de as partículas se difundirem na amostra. Como eventual solução, pode usar-se um tubo oco de carbono, no interior do qual se coloca o conjunto formado pela folha de carbono irradiada e a amostra de SiC. Este tubo seria depois fechado e colocado entre os eléctrodos, e repetindo o processo descrito em cima. Este método pode ser estudado com mais detalhe em trabalhos futuros relativos à difusão de ^7Be em SiC.

Capítulo VII – O ciclotrão isócrono no Institut für Strahlen- und Kernphysik da Universidade de Bona

O princípio do ciclotrão foi desenvolvido em 1931 por Ernest Lawrence no Berkeley National Laboratory. É utilizado para a aceleração de iões, no interior de uma câmara de vácuo num campo magnético, em trajectórias espiralares. A aceleração ocorre nos intervalos entre os sectores de aceleração, os “Dees” (que têm a forma de D). Estes encontram-se ligados a uma fonte de tensão de alta frequência que é utilizada como tensão de aceleração. Se um ião chega ao intervalo em fase com a tensão AC, será apanhado pelo campo e acelerado numa trajectória circular com um raio maior (adquire energia durante este processo).

No raio mais exterior, os iões acelerados podem ser ejectados do ciclotrão por um eléctrodo electrostático (deflector).

No ciclotrão clássico, uma partícula com massa m , carga e e velocidade v , num campo magnético B , move-se numa trajectória circular de raio r (a força centrífuga iguala a força de Lorentz):

$$m v^2/r = e B v$$

com $v = 2\pi r \nu$ (sendo ν o número de revoluções por segundo da partícula), vem

$$m/e = B/(2\pi \nu) \rightarrow \text{Condição de ressonância do ciclotrão}$$

Devido ao aumento relativístico da massa dos iões a elevadas energias, a condição de m/e ser constante (condição isocrónica) conduz ao aumento da intensidade do campo magnético para raios mais elevados. Este aumento do campo conduz a uma desfocagem do conjunto composto pelo “pulso” de partículas, sendo desta forma necessário uma focagem adicional (focagem de Thomas) para compensação.

O ciclotrão isócrono do ISKP foi construído durante o período de 1968-70 pela companhia AEG, sendo a terceira máquina deste género após Karlsruhe e Jülich.

Para poupar recursos e dinheiro, foi utilizado o magnete de ferro (com 250 toneladas) do sincro-ciclotrão que operava desde meados da década de 50, após terem sido feitas algumas modificações.

Imediatamente após a instalação do ciclotrão, a construção de um sistema de propagação e orientação de feixe, projectado para as vantagens específicas de um ciclotrão de energia variável e elevada qualidade de feixe (conduzindo o feixe a diferentes alvos para diferentes experiências), foi começada em colaboração com a AEG.

Os trabalhos mais importantes foram terminados no final de 1973.

A partir de Abril de 1975, o ciclotrão foi equipado com um mecanismo para injeção para iões externos com um magnete especial – Polschuh, e assim passou de uma fonte interna de iões para uma fonte externa.

Presentemente, existe uma fonte electrão-ressonância de ciclotrão (ECR) de 5GHz a dois-passos, assim como uma fonte para iões polarizados com um ionizador-ECR de 2.5GHz.

O sistema de aceleração, geradores de alta frequência, electrónica de operação, fontes de iões e sistemas de arrefecimento, são constantemente melhorados e actualizados de forma a assegurar e a otimizar o desempenho e a segurança deste acelerador.

Planta e esquemas do ciclotrão

Na seguinte figura encontram-se representados, todos os componentes do ciclotrão, das linhas de irradiação e elementos de protecção:

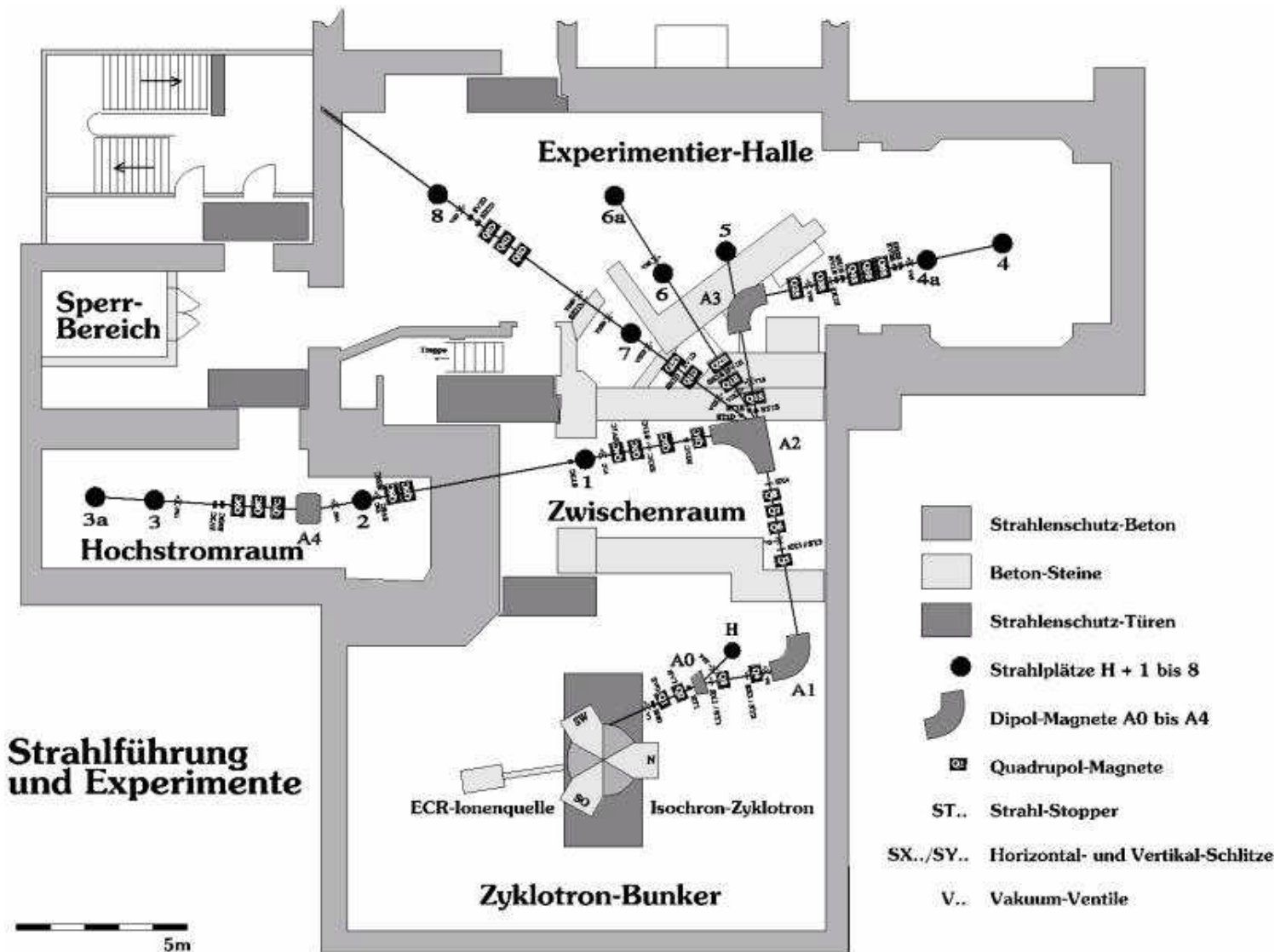


Fig. 41- Planta do ciclotrão isócrono do ISKP

- Strahlenschutz-Beton → Betão contendo chumbo para protecção contra radiação;
- Beton-Steine → Betão;
- Strahlenschutz-Türen → Porta contendo chumbo para protecção;
- Strahlplätze → Locais de irradiação;
- Dipol-Magnete → Dipolos magnéticos;
- Quadrupol-Magnete → Quadrupolos magnéticos;
- Strahl-Stopper → Paragem do feixe;
- Horizontal-und Vertical-Schlitze → Fendas horizontal e vertical;
- Vakuüm-Ventile → Válvulas de vácuo.

Em seguida encontra-se representado em detalhe, o ciclotrão e os seus vários constituintes:

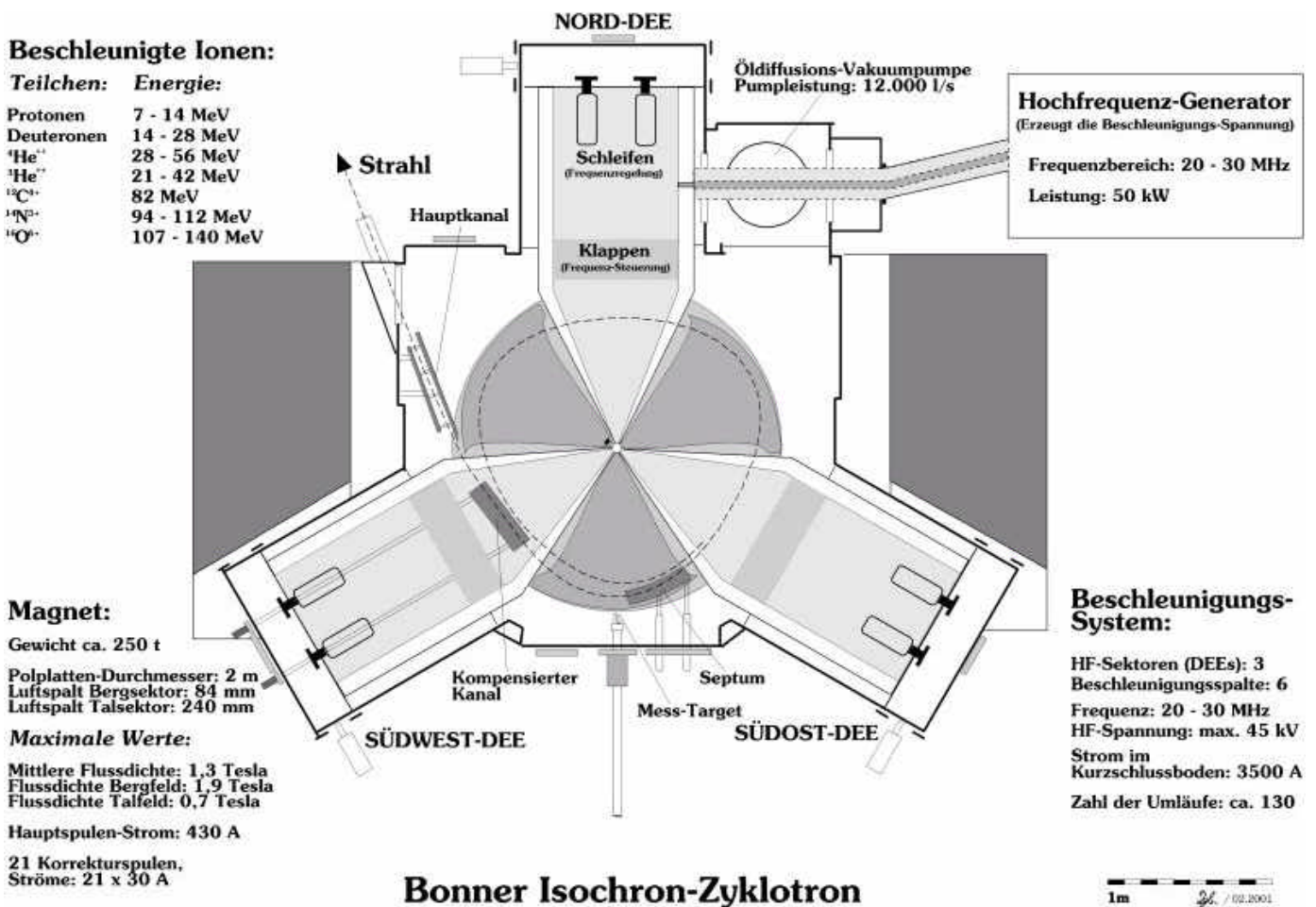


Fig. 42 – Esquema do ciclotrão

Legenda:

- Beschleunigte Ionen → Aceleração de Iões;
Teilchen → partícula;
- Strahl → Feixe;
- Hauptkanal → Canal principal;
- Schleifen → Ajuste para regulação de frequência;
- Klappen → Controlo de frequência;
- Öldiffusions-Vakuumpumpe → Bomba de vácuo difusora de óleo;
Pumpleistung → Velocidade de bombagem;
- Hochfrequenz-Generator → Gerador de alta frequência;
Frequenzbereich → Gama de frequências;
Leistung → Potência;
- Beschleunigungs-System → Sistema de aceleração;
HF-Sektoren → Sectores de alta frequência;
Beschleunigungsspalte → Fendas de aceleração;
HF-Spannung → Tensão de alta frequência;
Strom im Kurzschlussboden → Corrente em curto circuito à terra;
Zahl der Umläufe → Número de revoluções;
- Mess-Target → Alvo para medição;
- Kompensierter Kanal → Canal de compensação;

- Magnet → Magnete;

Gewicht → Peso;

Polplatten-Durchmesser → Diâmetro dos polos;

Luftspalt Bergsector → Fenda na secção de pico;

Luftspalt Talsector → Fenda na secção de vale;

Maximale werte → Valores máximos;

Mittlere Flussdichte → Densidade média de fluxo;

Flussdichte Bergfeld → Densidade de fluxo no pico do campo;

Flussdichte Talfeld → Densidade de fluxo no vale do campo;

Hauptspulen-Strom → Corrente na espira principal;

Korrekturspulen → Espiras de correcção;

Ströme → Corrente.

Nas seguintes tabelas encontra-se as características físicas/técnicas mais importantes do ciclotrão:

Magnete:

Massa do magnete de ferro	250 t
Diâmetro dos polos	2000 mm
Número de sectores de pico	3
Ângulo de sectores de pico	40°
Ângulo de espiral de sector de pico	0°
Fenda de ar (sector de pico/sector de vale)	84/240 mm
Fenda de ar livre	48 mm
Densidade média de fluxo	máx. 1.3T
Fluxo no sector de pico	máx. 1.9T
Fluxo no sector de vale	máx. 0.7T
Número de espiras magnéticas	2
Excitação do magnete	máx. 430 A / máx. 38kW
Número de espiras de correcção	21 pares
Excitação das espiras de correcção	± 30 A / máx. 6 kW

Tabela 29 – Características do magnete de ferro

Câmara de aceleração:

Material	V2A- Aço/Alumínio
Bomba difusora de óleo	12000 l/s
Pressão atingível na câmara	2 x 10 ⁻⁶ mbar

Tabela 30 – Características da câmara de aceleração

Fonte de iões:

Ressonância de ciclotrão – electrão (ECR)	Protões até oxigénio
ECR para iões polarizados	Protões, deuteron
Energia de injeção	0.004 – 0.008 MeV
Raio de injeção	37 mm

Tabela 31 – Características da fonte de iões

Gerador de alta frequência:

Número de sectores de alta-frequência	3
Número de fendas de aceleração	6
Gama de frequências alcançável	20.0 – 29.8 MHz
Tensão de alta frequência	máx. 40 kV
Potência de alta frequência	máx. 50 kW

Tabela 32 – Características do gerador de alta frequência

Extracção:

Raio de extracção	900 mm
Intensidade do campo eléctrico no deflector	80 – 100 kV/cm
Canal de compensação (corrente de espira)	Máx. 900 A
Intensidade do campo eléctrico no canal principal	0 – 10 kV/cm

Tabela 33 – Extracção do feixe

Propriedades do feixe:

Gama de energias	7 – 14 MeV por nucleão
Intensidade interna/externa do feixe	máx. 15 / 10 μ A
Ganho de energia por revolução (6 fendas de aceleração)	Até 240 keV
Número de revoluções	Até 120
Distância entre trajectórias (r = 900mm)	3 mm
Intervalo temporal entre impulsos de partículas (E_{\min}/E_{\max})	50 / 33.6 ns
Duração do impulso (E_{\min}/E_{\max})	0.75–6 / 0.5–4 ns
Velocidade do “impulso”	~50 000 km/s (~17% c)
Emitância da radiação interna (radial/axial)	8 / 11 mm mrad
Emitância do feixe extraído (radial / axial)	16 / 22 mm mrad
Incerteza na energia ($\Delta E/E$)	4 ‰
Resolução de energia no alvo após os dois magnetes de 90°	Até 1:10000

Tabela 34 – Características do feixe

Nesta imagem é visível o ciclotrão assim como a fonte de iões (à esquerda):



Fig. 43 – Ciclotrão e fonte de iões (à esquerda)

Os três D do ciclotrão :

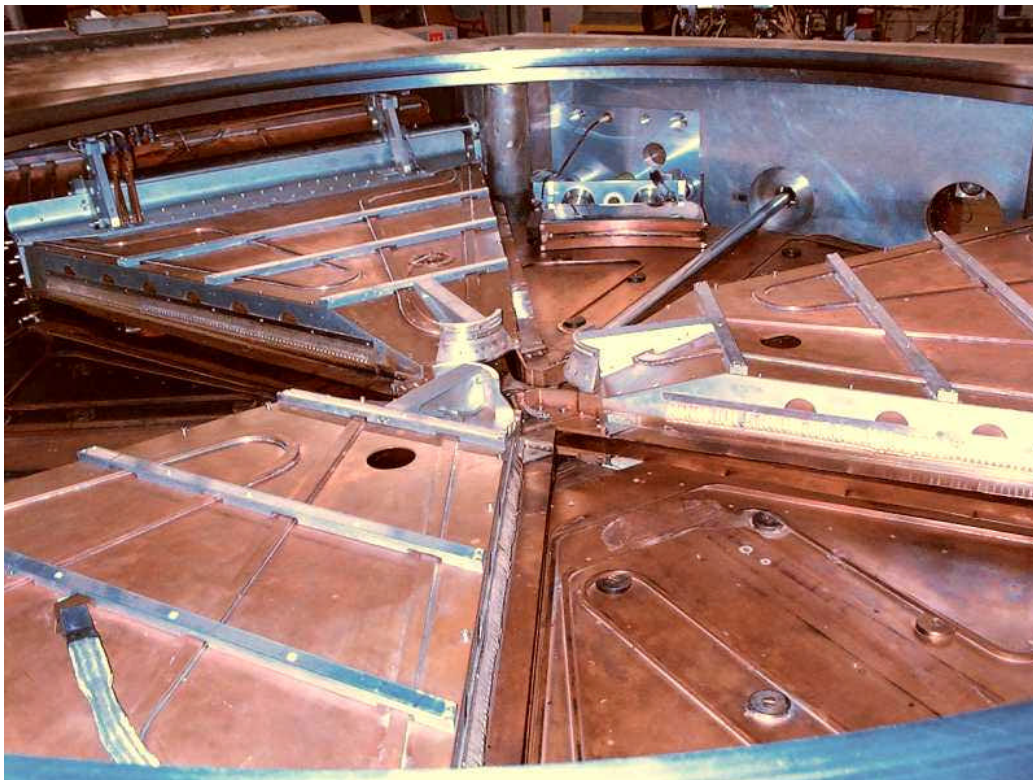
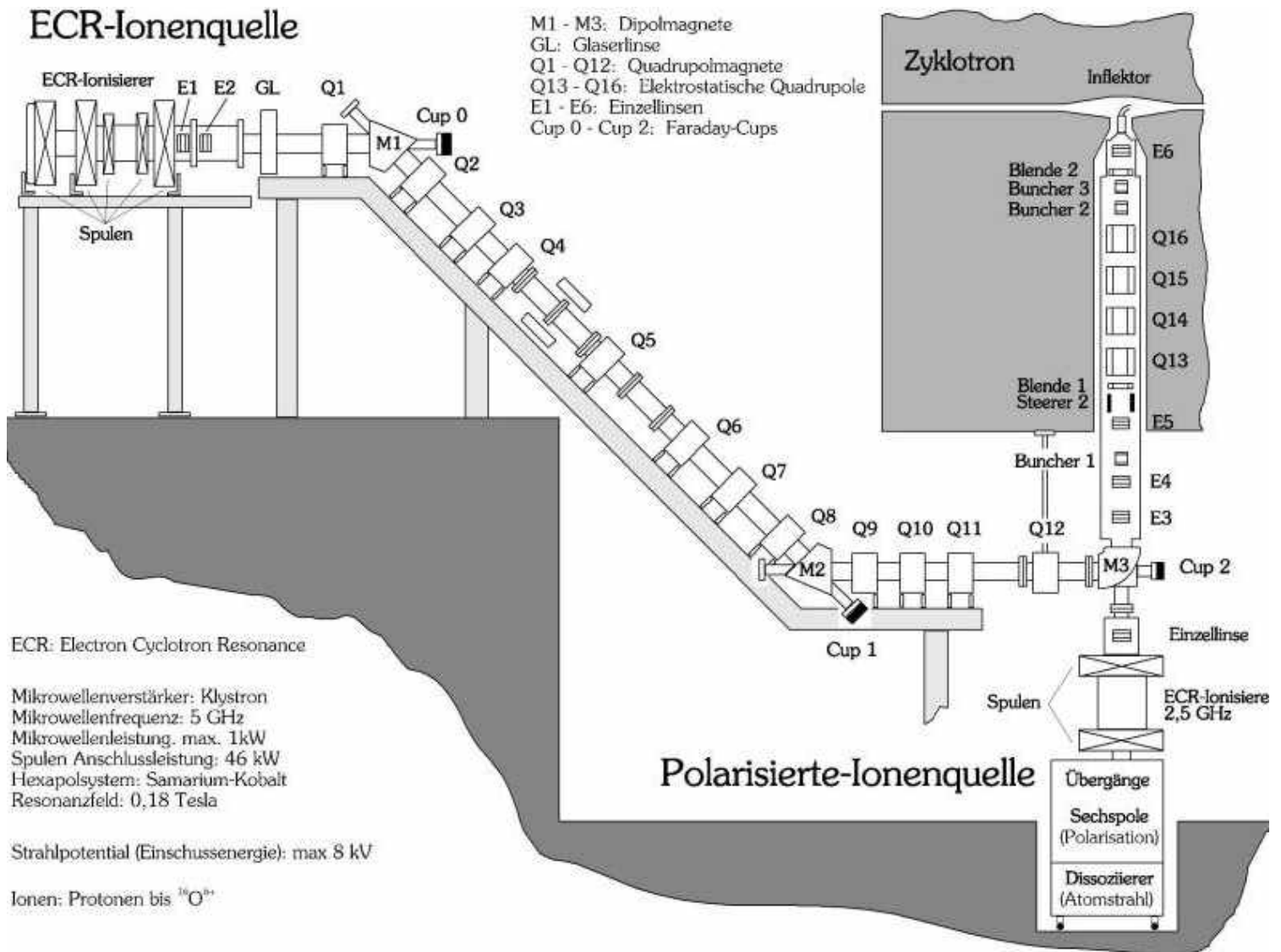


Fig. 44 – Os “Ds” do ciclotrão

A fonte de iões, cujas características foram previamente descritas, é um dos elementos chave para o sucesso deste projecto, a sua forma de funcionamento permite utilizar o gás de ^3He de forma racional, mantendo os custos de operação num nível bastante aceitável. Antes da instalação desta fonte, o consumo daquele gás era feito de uma forma tal que, apenas cerca de 2% da totalidade do gás era aproveitado para reacções nucleares. Com um tal baixo nível de eficiência da utilização do gás, era necessário recorrer a um sistema de recuperação que, por motivos de ordem técnica, foi abandonado. Após a instalação desta nova fonte de iões, chegou-se à conclusão que a sua eficiência era tal que, se justificava a utilização de ^3He como partícula incidente para reacções nucleares. Nas seguintes figuras, encontra-se representada a fonte de iões ECR, actualmente em utilização:



Ionenquellen und Injektion

Fig. 45 – Esquema da fonte de iões

- ECR-Ionenquelle → Fonte de iões ECR;
 ECR-Ionisierer → Ionizador ERC;
 Spulen → Espiras;
 Dipolmagnete → Dipolos magnéticos;
 Glaserlinse → Lente de Glaser;

- Quadrupolmagnete → Quadrupolo magnético;
 Elektrostatische Quadrupole → Quadrupolos electrostáticos;
 Einzellinzen → Lentes individuais;
- Zyklotron → Ciclotrão;
 Inflektor → Inflector;
 Blende → Diafragma;
 Buncher → Agrupador;
 Steerer → Orientador;
 Übergänge → Passagem;
 Sechspole → Hexapolo;
 Dissoziierer → Dissociador;
 - Mikrowellenverstärker → Amplificador de micro-ondas;
 - Mikrowellenfrequenz → Frequência das micro-ondas;
 - Mikrowellenleistung → Propagação das micro-ondas;
 - Spulen Anschlussleistung → Propagação de junção das micro-ondas;
 - Hexapolsystem → Sistema de Hexapolo;
 - Resonanzfeld → Campo de ressonância;
 - Strahlpotential (Einschussenergie) → Potential do feixe (Energia aplicada).

Apresentam-se em seguida duas perspectivas da fonte de iões, onde é possível ver em destaque, as espiras e os sistemas de visualização do nível de gás.

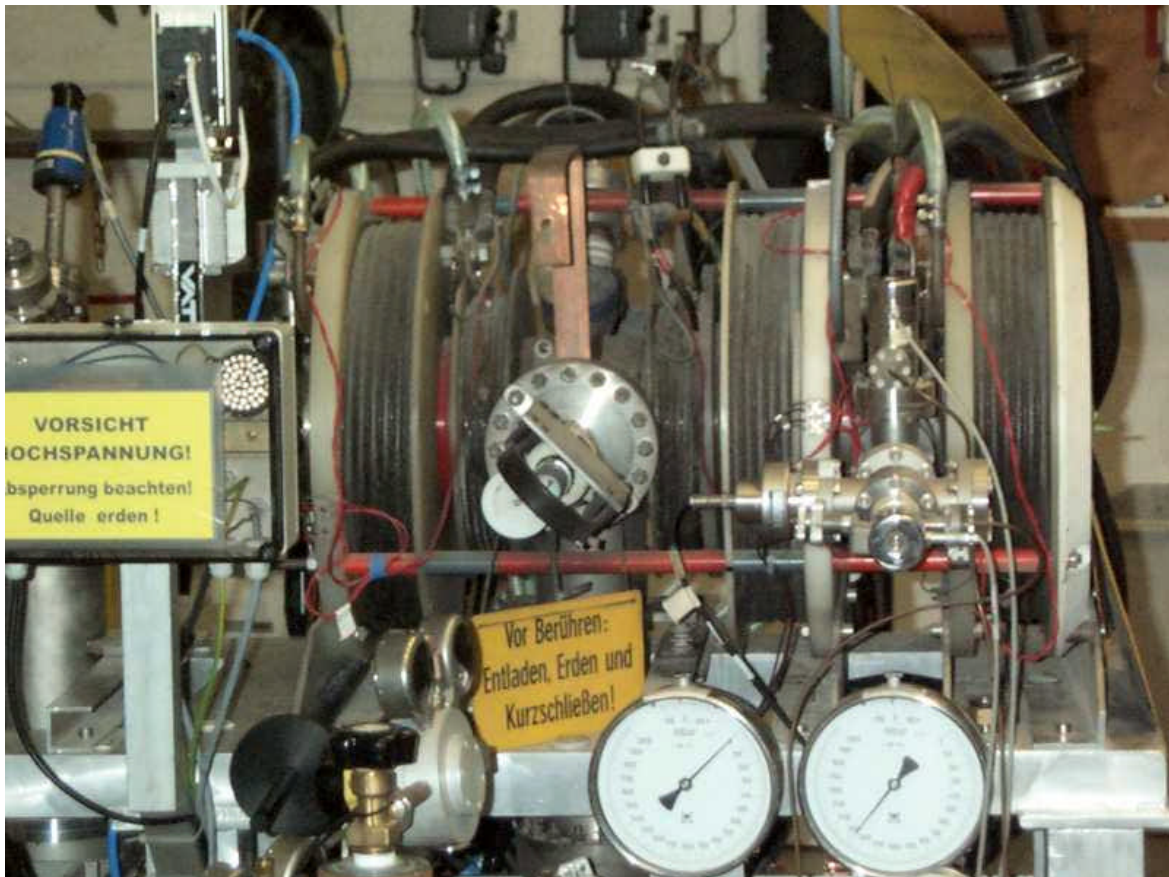


Fig. 46 – Detalhe da fonte de iões

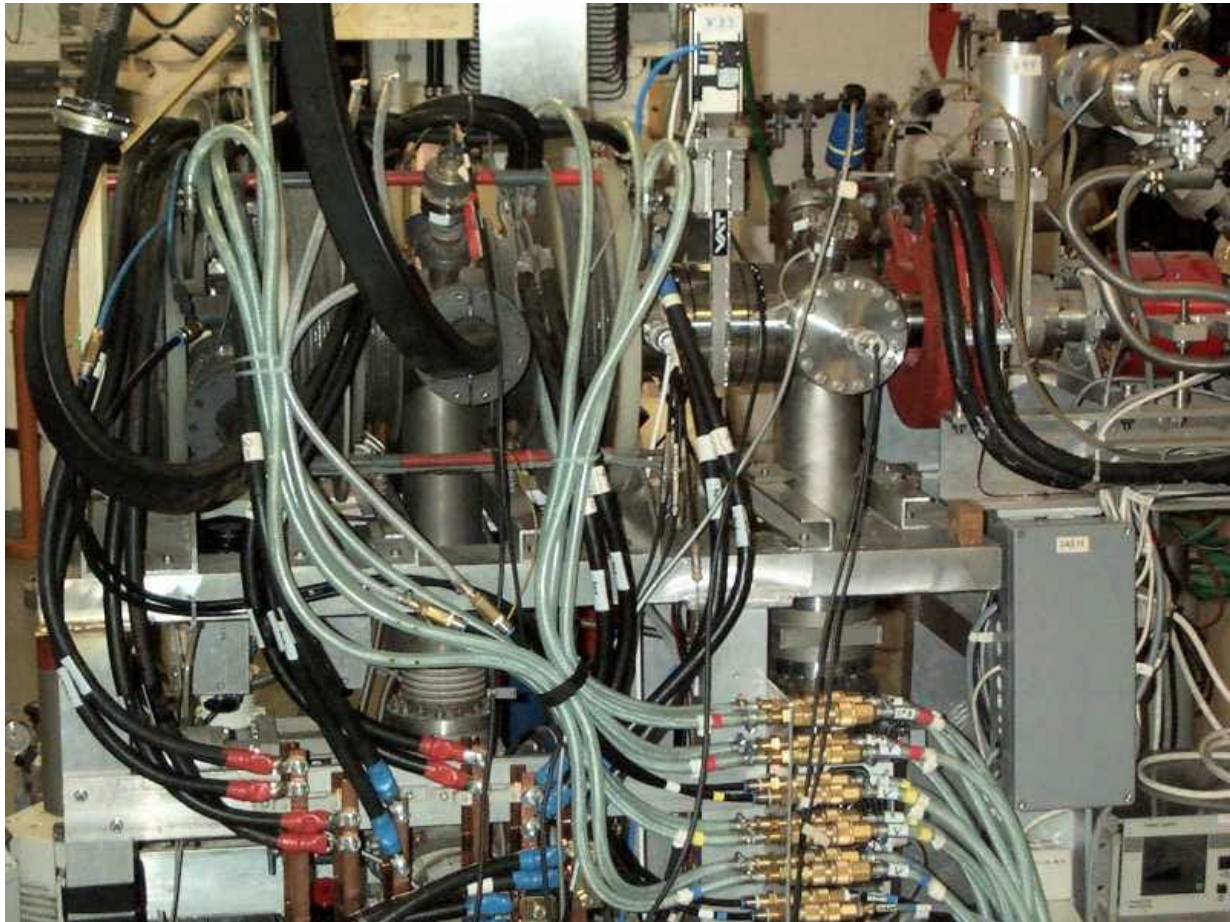


Fig. 47 – Outra perspectiva da fonte de iões

Na seguinte tabela estão indicados os iões que podem ser acelerados no ciclotrão de Bona:

Ião	Carga/Massa (e/m)	Energia [MeV]	Feixe externo [μA]	Observações
$^1\text{H}^{1+}$	1	7 - 14	10	tb. polarizado
$(^1\text{H}_2)^{1+}$	1/2	14 - 28	5	
$^2\text{H}^{1+}$	1/2	14 - 28	5	tb. polarizado
$^3\text{He}^{2+}$	2/3	21 - 42	3	
$^4\text{He}^{2+}$	1/2	28 - 56	3	
$^{12}\text{C}^{4+}$	1/3	81 - 84	0.2	
$^{14}\text{N}^{5+}$	0.36	94 - 110	0.2	
$^{16}\text{O}^{6+}$	0.38	107 - 140	0.2	

Tabela 35 – Feixes de iões que podem ser produzidos no ciclotrão

Activações produzidas na posição de alta corrente (ver posição H, na planta do ciclotrão – figura 41):

Isótopo	$t_{1/2}$	Reacção	Aplicação
^{11}C	20 m	$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$	Medicina (PET)
^{74}As	17.8 d	$^{74}\text{Ge}(p,n)^{74}\text{As}$	Fonte de positrões
^{77}Br	56 h	$^{75}\text{As}(\alpha,2n)^{77}\text{Br}$	Implantação de iões para semicondutores
^{103}Pd	17 d	$^{103}\text{Ru}(p,n)^{103}\text{Pd}$	“
^{111}In	2.7 d	$^{109}\text{Ag}(\alpha,2n)^{111}\text{In}$	“

Tabela 36 – Exemplos de experiências efectuadas na posição de alta corrente

Exemplos de aplicações experimentais em física nuclear efectuadas em feixes externos:

Reacção	Aplicação
$^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$	Feixes de neutrões para interacções nucleão-nucleão (deuterões polarizados e não polarizados como partículas incidentes)
Reacções (α,xn) ($^{12}\text{C},xn$) ($^{16}\text{O},xn$)	Espectroscopia nuclear, medições de tempos de vida média em diferentes núcleos

Tabela 37 – Exemplos de aplicações das irradiações com feixes externos

O controlo do ciclotrão é feito a partir de uma sala de comando, onde se ajustam os diferentes mecanismos que conduzem o feixe até ao alvo final. Nesta sala, procede-se ao ajuste da intensidade do feixe, à sua focagem, estabilização e outros parâmetros relacionados com o feixe. O ciclotrão funciona em ciclos semanais, com vários operadores que efectuam turnos de forma a assegurar a constante vigilância e controlo do equipamento. Na seguinte figura podemos ver a sala de controlo do ciclotrão:



Fig . 48 – Sala de comando do ciclotrão

Capítulo VIII – Implantação no separador de isótopos

O separador de isótopos do ISKP

O separador e implantador de radioisótopos, juntamente com o ciclotrão isócrono de Bona, formam um conjunto de instrumentos de importância capital para a investigação em física nuclear e do estado sólido, desenvolvida neste instituto. Devido às suas características técnicas, é possível implantar isótopos separados por massa, em amostras especialmente preparadas, com energias de implantação entre 1 e 160 keV.

Na figura seguinte representa-se esquematicamente o separador de isótopos do ISKP:

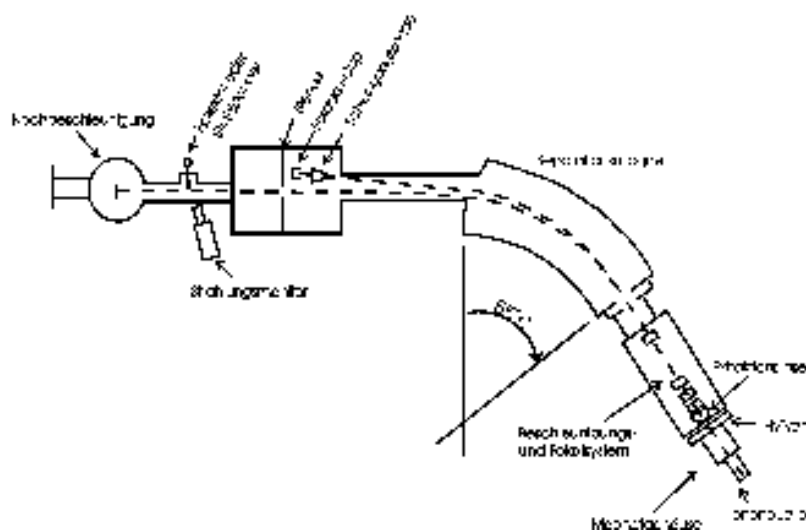


Fig. 49 – Esquema do separador de isótopos

As principais aplicações do separador de isótopos estão relacionadas com a implantação de isótopos radioativos e isótopos estáveis.

Procede-se à implantação de isótopos radioativos para:

- Espectroscopia nuclear com partículas carregadas;
- Investigação de interações hiperfinas em sólidos;
- Estudos de difusão de marcadores radioativos em materiais;
- Observação de transmutação de impurezas em semicondutores.

Implantam-se isótopos estáveis para:

- Produção de alvos calibrados altamente enriquecidos;
- Dopagem de materiais com impurezas;
- Produção de danos por irradiação em sólidos.

Este separador de iões apresenta como grande vantagem, a sua universalidade, uma vez que permite obter os radioisótopos primários de virtualmente todos os elementos químicos.

Duas das folhas de carbono utilizadas para parar o feixe de ^3He foram usadas em experiências de implantação, efectuadas pelo grupo do separador de isótopos.

Primeiro teste de implantação

Para este primeiro teste de implantação com o implantador de isótopos, a folha de carbono irradiada durante os dias 31/1, 1/2 e 2/2, foi cedida ao grupo do implantador, contendo uma actividade de aproximadamente 7.28MBq. Esta folha de carbono foi utilizada para a implantação de ^7Be num alvo de cobre. Para se poder avaliar a dispersão do feixe produzido com o implantador, foram também utilizadas duas pequenas barras de alumínio colocadas de forma a que o feixe passe entre elas:

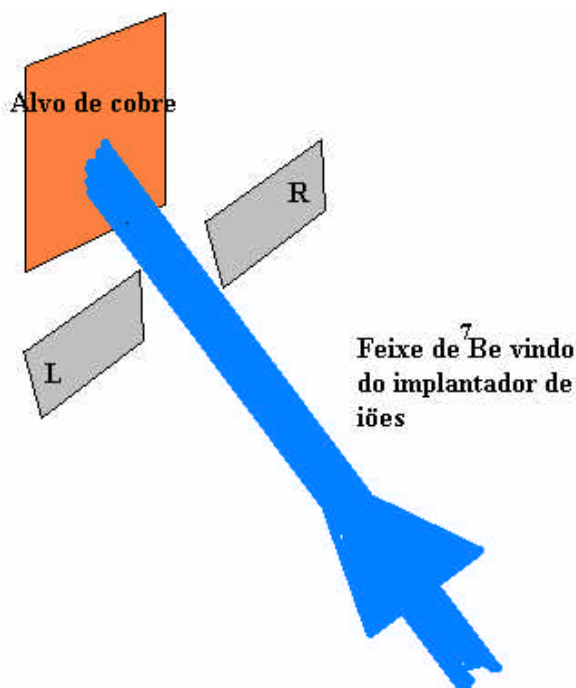


Fig. 50 – Experiência de implantação

Após a implantação, foram adquiridos espectros γ do alvo de carbono e das barras de alumínio cedidas, por forma a quantificar a eficiência do processo de implantação. Uma vez que as amostras estavam pouco activas, foram colocadas directamente sobre o detector, e os espectros foram adquiridos durante 10 minutos. Para o alvo de cobre, obteve-se uma actividade de cerca de 534 Bq. Para a barra de alumínio R, a actividade medida foi de 185.6 Bq, enquanto que para a barra L, a actividade foi cerca de 16.25 Bq. Podemos daqui concluir, a eficiência deste primeiro teste de implantação no implantador de isótopos, foi de 0.0073%.

Segundo teste de implantação

Neste segundo teste de implantação, o grupo do separador de isótopos utilizou a folha de carbono irradiada durante os dias 20 – 23/3, contendo uma actividade de aproximadamente 9.32 MBq. Após implantação, foi-nos enviada a amostra que serviu de alvo para esta implantação. Obteve-se o seguinte espectro:

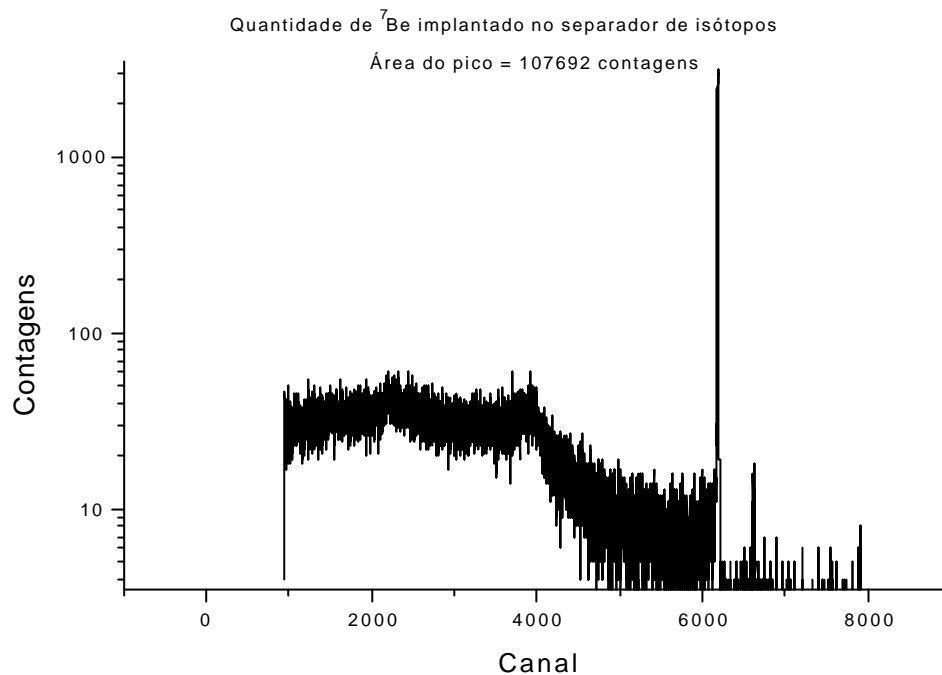


Fig. 51 – Espectro do alvo da segunda implantação no separador de isótopos

A partir da informação contida neste espectro, podemos calcular a actividade do alvo da implantação: $A = 12.6 \text{ KBq}$.

Assim sendo, a eficiência deste segundo teste de implantação foi de 0.135%, o que em comparação com o teste anterior revela uma melhoria por um factor cerca de 18.5 vezes superior. Esta melhoria pode estar relacionada com o facto de neste segundo teste, o local de incidência do feixe de ^3He na folha de carbono ter sido identificado com mais rigor que no teste anterior. Visto que se trata de uma área de dimensões bastante reduzidas (círculo com um raio de 1 mm), a identificação do local da folha onde está concentrado o ^7Be produzido não é feita de uma forma precisa.

Conclusões finais

Este trabalho consistiu no estudo da reacção $^{12}\text{C}(^3\text{He}, 2\alpha)^7\text{Be}$, permitindo obter informação sobre certos parâmetros experimentais, como por exemplo, a gama de energias com que as partículas de ^7Be são produzidas e implantadas, a profundidade que atingem quando implantadas nos materiais semicondutores aqui utilizados como alvos (SiC e GaN), a distribuição lateral das partículas, entre outros.

Este método de produção e implantação de ^7Be mostrou-se bastante adequado para o efeito pretendido, nomeadamente a implantação do dopante Be nestes materiais semicondutores. Tal como foi referido, o elemento berílio tem sido apontado como um possível candidato para a dopagem de semicondutores com hiato de energia grande, tais como o nitreto de gálio e o carboneto de silício, devido ao facto de ser um elemento do grupo II e existir alguma evidência sobre o seu carácter de impureza aceitadora nestes semicondutores. No entanto, o carácter de aceitador deste elemento ainda não está bem determinado, sendo necessário efectuar estudos adicionais sobre este assunto. Os grupos do estado sólido que nos enviaram amostras de SiC e GaN, estão presentemente a efectuar análises sobre as amostras implantadas no ciclotrão de Bona, e numa fase posterior será possível, a partir destes e outros dados, obter conclusões sobre o carácter do dopante ^7Be .

Em comparação com outros métodos de produção deste radioisótopo, o método por nós utilizado no ISKP (para além de ser aquele que melhor se adequa às condições encontradas no ciclotrão deste instituto) permite utilizar feixes com correntes relativamente elevadas, o alvo primário de carbono é de fácil produção e encontra-se facilmente disponível. Para além destes factos, devido à forma do suporte de amostras utilizado durante estas irradiações, é possível implantar o radioisótopo produzido, em duas amostras simultaneamente. Devido ainda a este facto, as amostras encontram-se fora do alcance do feixe de ^3He , evitando eventuais danos causados por um feixe de partículas com esta gama de energias.

O método permite obter quantidades apreciáveis do radioisótopo, sendo estas quantidades bastante razoáveis para os estudos efectuados posteriormente com as amostras implantadas, nomeadamente DLTS, fotoluminescência e estudos de efeito de Hall.

No que diz respeito à implantação do radioisótopo ^7Be , nos dois materiais utilizados como alvo, durante este projecto, há que referir o facto de que a implantação em carboneto de silício não necessita a utilização dos atenuadores de alumínio (projectados inicialmente), uma vez que o berílio é implantado no cristal e não no substracto, como aconteceu supostamente no caso do nitreto de gálio. Tal como foi afirmado, os cristais de GaN são crescidos sobre um substracto de safira, e normalmente têm uma espessura de apenas, cerca de $2\mu\text{m}$. Como foi possível estimar a partir das simulações efectuadas com o programa TRIM, a grande maioria das partículas tem um alcance superior a $2\mu\text{m}$ em GaN. Assim sendo, é necessária a utilização de atenuadores de alumínio adequadamente projectados para o efeito.

Este estudo permitiu também concluir sobre a distribuição lateral das partículas implantadas na amostra, utilizando o suporte de amostras projectado pelo Dr. R. Vianden e as condições de irradiação descritas anteriormente. Assim sendo, vimos que cerca de 70 a 80% das partículas, são implantadas segundo ângulos compreendidos entre 10° e 20° .

A partir deste estudo é possível compreender melhor o que acontece durante a produção e a implantação deste radioisótopo num alvo de alumínio, e utilizar esta informação para obter uma ideia aproximada do que acontece nos materiais semicondutores acima citados. Foi possível obter informações sobre a profundidade e distribuição lateral das partículas implantadas, facilitando a visualização do que acontece durante o processo de implantação.

Referências bibliográficas

- Leo, W. R. – „Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments – A How-to Approach“, Springer-Verlag (1987).
- Nakamura, Shuji; Fasol, Gerhard – „The Blue Laser Diode – GaN Based Light Emitters and Lasers“, Springer (1997).
- Lederer, C. M.; Hollander, J. M.; Perlman, I. – „Table of Isotopes – Eighth Edition“, John Wiley & Sons (1999).
- Maslakovets, Y. P.; Mokhov, E. N.; Vodakov, Y. A.; Lomakina, G. A. – „Diffusion of Beryllium in Silicon Carbide“, Soviet Physics – Solid state, Vol. 10, N°. 3, Setembro 1968.
- Krieger, M.; Laube, M.; Weidner, M.; Pensl, G. – „Beryllium-Related Defect Centers in 4H-SiC“, Institute of Applied Physics, University of Erlangen-Nürnberg (2001).
- Albrecht, F.; Achtziger, N.; Grillenberger, J.; Pasold, G.; Hülsen, C.; Witthuhn, W. – „Beryllium in 4H-SiC: Identification of a deep level using Radiotracer-DLTS“, Institut für Festkörperphysik, Friedrich-Schiller –Universität Jena; Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen IIS-A – Erlangen (2001).
- <http://sic.dongguk.ac.kr/about.html>
- <http://nina.ecse.rpi.edu/shur/SiC/Sld135.html>
- Keller, K. A.; Lange J.; Münzel H.; Pfenning G. – „Landolt-Börnstein New Series I/13f-Excitation functions for charged-particle induced nuclear reactions“, Springer-Verlag (1973).
- Edgar, J. H.; Strite, S.; Akasaki, I.; Amano, H.; Wtzel, C. – „Properties, processing and applications of Gallium Nitride and related semiconductores“, Inspec (1999).
- Sze, S. M. – „Physics of semiconductor devices –2nd edition“, John Wiley and Sons (1981).
- Fulmer, C. B.; Goldberg, D. A. – „Excitation functions for ⁷Be production by light-ion bombardment of ¹²C“, Physical Review C, Volume 11, N°. 1 Janeiro 1975.
- Détraz, C.; Duhm H. H.; Hafner, H. – „The (³He, ⁷Be) reaction on light nuclei“, Nuclear Physics A147 (1970) 488-508, North-Holland Publishing Co.
- Agullo-Lopez, F.; Catlow, C. R. A.; Townsend, P. D. – „Point defects in materials“, Academic Press (1988).

Agradecimentos

De entre todas as pessoas a quem quero agradecer, por me terem facultado esta experiência tão inesquecível que foi este estágio na Alemanha, gostaria de destacar, o Professor José Carvalho Soares pelo facto de me ter mostrado, durante as aulas da disciplina de Técnicas Nucleares, o que eu realmente pretendo fazer para o resto da minha vida. Obrigado pelo crédito que depositou em mim, farei os possíveis para que possa corresponder sempre às suas expectativas.

Gostaria também de agradecer ao Doutor Reiner Vianden pelo convite feito no ano passado em Bad Honnef, e que tornou tudo isto possível. Quero agradecer-lhe a forma como fui acolhido no seu grupo de trabalho e como me senti sempre integrado. Foi uma experiência muito enriquecedora, tanto a nível profissional como a nível pessoal. Vielen, vielen dank für alles!

Um muito obrigado à Professora Iveta Pimentel, pelo seu grande apoio na organização e coordenação burocrática do meu estágio sobre o programa Sócrates/Erasmus. Obrigado pela sua dedicação e empenho no que diz respeito à bolsa que recebi deste programa.

Ich bin meiner Arbeitsgruppe sehr dankbar für alles, und für ihre freundschaft. Vielen dank Katharina, Florian, Jörn, Monika, Malte, je te remercie Ronan, thank you Genene und veel dank voor alles Tanja (tens que praticar mais o teu português, um „Fernando Pessoa“ por semana e vais ver...).

I would like to thank all the people I met during my staying in Bonn, that helped me (somehow) feeling at home, away from home. I must say you did a great job. I will never forget what, until now, was the best experience of my life. I would like especially to thank Fidel (you were like a big brother to me!), Ilham for being a good friend, Maddy for being a pal, Kostas for putting up with me. Ευχαριστου Χριστινα ισι Αλεξη!!! Θα τα πουμε μετα (Ελλαδος!!). Grazie Violetta per tutto, supratutto per la tua amicizia. Io spero rivederti presto in Portogallo. Thankx for everything!!!!

Gostaria ainda de agradecer aos meus amigos portugueses, que apesar da distância, estiveram sempre comigo e acompanharam o meu trabalho (desculpem lá as secas que passaram quando leram os meus, mais que muitos, e-mails sobre o meu projecto) e todas estas novas vivências por que passei. Muito obrigado pelo vosso apoio, pelos e-mails semanais (quando não diários!) e por tudo. Gostaria de destacar o meu enorme muito obrigado à Bé, por seres quem és e sobretudo por me teres aturado durante estes últimos três anos. Adoro-te por isso e por seres uma das pessoas mais especiais no mundo, para mim! Obrigado Susana, pela tua amizade e cumplicidade em tudo, nunca hei-de esquecer a força que sempre me deste. Obrigado Filipa pelas tuas palavras de ânimo sempre que precisei, pela tua companhia e pela tua boa disposição.

Finalmente, gostaria de dedicar este trabalho às duas pessoas que me permitiram chegar até aqui, e que sempre me mostraram que vale a pena lutar pelo que se acredita, e que mesmo quando as coisas não se mostram favoráveis, nunca se deve desistir. Obrigado mãe e mana por toda a força que sempre me deram, pelos valores que me inculcaram e por todo o Amor e Amizade (com A grande) que sempre me deram. Amo-vos!