

Universidade de São Paulo  
Instituto de Física

SBI-IFUSP



305M810T3489

**Estudo da Reação  $^{29}\text{Si}(\text{p}, 2\alpha)^{22}\text{Na}$**

Marcelo Takeshi Yamashita



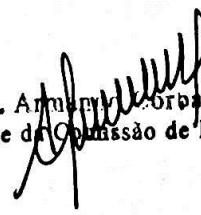
Dissertação de Mestrado  
submetida ao Instituto de Física  
da Universidade de São Paulo

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Iuda Dawid Goldman vel Lejbman  
Prof. Dr. José Luciano Miranda Duarte  
Prof. Dr. Mauro da Silva Dias

(IFUSP)   
(IFUSP)  
(IPEN)

São Paulo  
2001

Prof. Amílcar Corrêa Ferraz  
Residente da Comissão de Pós Graduação  


Defendeu em 19/03/2001

539.75

Y19 e

M

ex. 1

**FICHA CATALOGRÁFICA**

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

Yamashita, Marcelo Takeshi

Estudo da Reação  $^{29}\text{Si}(\text{p},2\alpha)^{22}\text{Na}$ .  
São Paulo, 2001.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo.  
Instituto de Física – Departamento de Física Experimental

Orientador: Prof. Dr. Iuda Dawid Goldman vel Leibman  
Área de Concentração: Física Nuclear

- Unitermos: 1. Reações Nucleares;  
2. Seções de Choque;  
3. Espectroscopia Gama;  
4. Radioatividade Residual;  
5. Modelo Coletivo.

USP/IF/SBI-011/2001

**Aos Meus Pais  
Tomie e Takeshi**

# Agradecimentos

Ao Professor Iuda Dawid Goldman vel Lejbman pela orientação desde o início da minha vida acadêmica e pela amizade.

Ao Professor Paulo Reginaldo Pascholati pela leitura da dissertação e por tudo que precisei durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor Manoel Tiago Freitas da Cruz pelas conversas que me ajudaram muito no término da dissertação e pela inestimável amizade.

Aos Professores Otaviano Augusto Marcondes Helene e Vito Roberto Vanin pela ajuda na parte estatística e no arranjo experimental.

Aos amigos do Laboratório que sempre estiveram prontos a me ajudar, em especial aos amigos de sala Francis Bringas Gutiérrez e Rogério Tramontano.

Ao pessoal do IPEN, Valdir Sciani, Luiz Carlos do Amaral Sumiya e Sumair pela boa vontade na irradiação das amostras.

Ao Roberto da Rocha Lima pelo projeto do recipiente das amostras.

À Rita Tereza dos Santos por toda ajuda que precisei na parte química.

Ao pessoal da eletrônica, Alexandre, Cacá, Renato e Edu, por toda ajuda que precisei com o detector durante as medidas.

Ao Mário Sanematsu do Laboratório de Microeletrônica da Poli pela doação das amostras de silício.

Às Secretárias do Laboratório Vera, Tereza e Sandra.

Aos amigos da graduação pelos bons momentos que passamos juntos.

À Raquel pelo carinho, compreensão e companheirismo.

Aos meus pais Tomie e Takeshi que sempre estiveram presentes em todos os momentos da minha vida, dividindo as dificuldades e compartilhando os momentos felizes.

À FAPESP pelo financiamento do projeto.

## Resumo

Foi realizado o estudo da reação  $^{29}\text{Si}(\text{p}, 2\alpha)^{22}\text{Na}$  utilizando o feixe de prótons de energia nominal de 24 MeV do *IPEN*. A energia e a corrente do feixe de prótons foram monitoradas utilizando uma lâmina de 50  $\mu\text{m}$  de cobre colocada na frente da amostras de silício natural. A energia do feixe de prótons foi obtida através da razão entre as atividades do  $^{62}\text{Zn}$  e  $^{65}\text{Zn}$ , provenientes respectivamente das reações  $^{63}\text{Cu}(\text{p}, 2\text{n})$  e  $^{65}\text{Cu}(\text{p}, \text{n})$ . A corrente efetiva foi calculada utilizando os mesmos resultados. Foram realizadas duas irradiações sobre placas de silício. Na primeira irradiação foram utilizadas 6 placas de  $0,56 \text{ g/cm}^2$  e na segunda 8 placas de  $1,4 \text{ g/cm}^2$ . Nas duas irradiações foi utilizado o método de "stacked-foil" que permite obter em uma única irradiação os pontos necessários para a função de excitação. A energia do feixe de prótons obtida nas duas irradiações está abaixo do limiar de qualquer reação que possa produzir o  $^{22}\text{Na}$  a partir dos nuclídeos  $^{28,30}\text{Si}$ . Para assegurar a origem do  $^{22}\text{Na}$  como sendo da reação em estudo uma irradiação com nêutrons térmicos de uma amostra de silício de mesma procedência das irradiadas no ciclotron foi realizada no reator de 5 MW do *IPEN*, com resultado descrito no texto. Os resultados de seção de choque obtidos em energias próximas ao limiar apresentaram consistência com resultados da literatura, embora apresentem flutuações, objeto de discussão no texto. Medidas de seção de choque por atividade residual também foram efetuadas para as reações  $\text{Mg}(\text{p}, 2\text{pxn})^{22}\text{Na}$  e  $\text{Ti}(\text{p}, 2\text{pxn})^{43-48}\text{Sc}$  utilizando a energia máxima do feixe de prótons do ciclotron.

## Abstract

The study of  $^{29}\text{Si}(\text{p}, 2\alpha)^{22}\text{Na}$  reaction has been made using the 24 MeV proton beam from IPEN's cyclotron. The proton beam energy and the current have been monitored by mean of a copper foil placed in front of the natural silicon foils. The energy has been obtained by the ratio of  $^{62}\text{Zn}$  and  $^{65}\text{Zn}$  activities deriving respectively from  $^{63}\text{Cu}(\text{p}, 2\text{n})$  and  $^{65}\text{Cu}(\text{p}, \text{n})$  reactions. The effective current has been calculated using the same results. Irradiation in silicon foils has been made two times. For the first irradiation it have been used 6 foils of  $0.56 \text{ g/cm}^2$  and for the second 8 foils of  $1.4 \text{ g/cm}^2$ . In both irradiations it has been used the "stacked-foil method" that allows in only one irradiation the necessary points to the excitation curve. The energy obtained in both irradiations was under the threshold of any reaction that can produce  $^{22}\text{Na}$  from  $^{28,30}\text{Si}$  nuclides. In order to assert the origin of  $^{22}\text{Na}$  (as provenient from the  $^{29}\text{Si}(\text{p}, 2\alpha)^{22}\text{Na}$  reaction) a termal neutron irradiation has been made at the 5 MW IPEN's reactor on a silicon sample. The cross sections results obtained in energies close to the reaction threshold presented concordance with results found in the literature, although they show some fluctuations, object of discussion in the text. Cross sections measurements by residual activity have still been performed to the  $\text{Mg}(\text{p}, 2\text{pxn})^{22}\text{Na}$  and  $\text{Ti}(\text{p}, 2\text{pxn})^{43-48}\text{Sc}$  reactions using the maximum proton beam energy from cyclotron.

# Índice

Agradecimentos .....	ii
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Lista de Tabelas.....	vi
Lista de Figuras.....	vii
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Método Experimental.....</b>	<b>8</b>
2.1. Considerações Preliminares .....	8
2.2. Produção das Fontes .....	9
2.3. Sistema de Aquisição .....	12
2.4. Calibrações Iniciais .....	13
2.5. Calibração de Energia .....	15
2.6. Calibração de Eficiência.....	18
2.7. Determinação da Energia Inicial e Corrente Integrada do Feixe de Prótons .....	26
2.8. Análise das Placas de Silício .....	29
2.9. Análise da Impureza de $^{23}\text{Na}$ na Amostra de Silício .....	46
2.10. Análise da Amostra de Magnésio .....	47
2.11. Análise da Amostra de Titânio .....	48
<b>3 Cálculo das Seções de Choque e Discussão dos Resultados .....</b>	<b>54</b>
3.1 Presença de Impurezas nas Amostras .....	63
<b>4 Conclusões e Perspectivas .....</b>	<b>65</b>
Referências.....	68

# **Lista de Tabelas**

1.1 Radionuclídeos usualmente utilizados para o estudo de raios cósmicos solares [Re91].....	3
2.1 Fatores de correção devido ao efeito soma para os diversos picos do $^{152}\text{Eu}$ .....	24
2.2 Energia, em MeV, do feixe de prótons ao longo das placas de silício na primeira e segunda irradiação.....	28
2.3 Corrente do feixe de prótons utilizada nas irradiações de Ti, Mg e Si (primeira e segunda irradiação).....	28
2.4 Análise do espectro referente à primeira placa de Si na primeira irradiação. Em destaque o pico referente ao $^{22}\text{Na}$ .....	30
2.5 Análise do espectro referente à segunda placa de Si na primeira irradiação. Em destaque o pico referente ao $^{22}\text{Na}$ .....	31
2.6 Análise do espectro referente à terceira placa de Si na primeira irradiação. Em destaque o pico referente ao $^{22}\text{Na}$ .....	32
2.7 Análise do espectro referente à quarta placa de Si na primeira irradiação. Em destaque o pico referente ao $^{22}\text{Na}$ .....	32
2.8 Análise do espectro referente à quinta placa de Si na primeira irradiação.....	33
2.9 Análise do espectro referente à sexta placa de Si. Em destaque o pico referente ao $^{22}\text{Na}$ .....	33
2.10 Análise do espectro referente à primeira placa de Si da segunda irradiação. Em destaque o pico referente ao $^{22}\text{Na}$ .....	39
2.11 Análise do espectro referente à segunda placa de Si da segunda irradiação. Em destaque o pico referente ao $^{22}\text{Na}$ .....	40
2.13 Análise do espectro referente à terceira placa de Si da segunda irradiação. Em destaque o pico referente ao $^{22}\text{Na}$ .....	41
2.14 Análise do espectro referente à quarta placa de Si da segunda irradiação.....	41
2.15 Análise do espectro referente à quinta placa de Si da segunda irradiação.....	42
2.16 Análise do espectro referente à sexta placa de Si da segunda irradiação.....	42
2.17 Dados referentes à análise do espectro do magnésio.....	47
2.18 Análise do espectro de 24 h referente à folha de Ti.....	49
3.1 Valores de Q para as possíveis reações formadoras dos nuclídeos detectados nos espectros. O valores do Q foram retirados de J.K. Tuli [Tu90].....	64

# **Lista de Figuras**

1.1 Distribuição do fluxo vs. energia de prótons solares em função da profundidade na lua [Re91].....	4
1.2 Esquema de decaimento do $^{22}\text{Na}$ [Fi96a] .....	5
1.3 Esquema de decaimento do $^{26}\text{Al}$ [Fi96a] .....	5
2.1 Simulação da entrada de 30 prótons de 24 MeV na folha de cobre (monitor) e nas placas de silício feito pelo programa TRIM [Zi85].....	10
2.2 Projeto do recipiente das amostras de silício .....	11
2.3 Modelo simplificado do sistema de aquisição utilizado .....	12
2.4 Calibração energia vs. Canal.....	16
2.5 Calibração de eficiência vs. energia para o cobre feita a uma distância de 20 cm fonte-detector ...	20
2.6 Calibração de eficiência vs. energia para o magnésio e titânio feita a uma distância de 25 cm fonte-detector. As barras de incerteza dos pontos experimentais não foram colocadas pois são muito menores que a escala utilizada em y (0,3 % da menor divisão) .....	21
2.7 Esquema de decaimento para explicar o procedimento utilizado na correção de soma .....	22
2.8 Calibração de eficiência vs. energia fonte “encostada” no detector .....	25
2.9 Ajuste do pico de 1274 keV do $^{22}\text{Na}$ referente à primeira placa de Si na primeira irradiação .....	34
2.10 Ajuste do pico de 1274 keV do $^{22}\text{Na}$ referente à segunda placa de Si na primeira irradiação .....	34
2.11 Ajuste do pico de 1274 keV do $^{22}\text{Na}$ referente à terceira placa de Si na primeira irradiação.....	35
2.12 Ajuste do pico de 1274 keV do $^{22}\text{Na}$ referente à quarta placa de Si na primeira irradiação .....	35
2.13 Região de 1274 keV referente à quinta placa de Si na primeira irradiação evidenciando a ausência de pico .....	36
2.14 Ajuste do pico de 1274 keV do $^{22}\text{Na}$ referente à sexta placa de Si .....	37
2.15 Esquerda: passeio referente ao pico de 122 keV (canal 318) Abaixo: passeio referente ao pico de 1771 keV (canal 5190) .....	37
2.16 Ajuste do pico de 1810 keV (primeiro pico à esquerda) do $^{56}\text{Co}$ . Espectro de 96 h referente a todas as placas de Si .....	38
2.17 Ajuste do pico de 1238 keV do $^{56}\text{Co}$ . Espectro de 96 h referente a todas as placas de Si .....	38
2.18 Ajuste do pico de 1274 keV do $^{22}\text{Na}$ referente à primeira placa de Si da segunda irradiação.....	43
2.19 Ajuste do pico de 1274 keV do $^{22}\text{Na}$ referente à segunda placa de Si da segunda irradiação .....	43
2.20 Ajuste do pico de 1274 keV do $^{22}\text{Na}$ referente à terceira placa de Si da segunda irradiação .....	44
2.21 Região de 1274 keV referente à quarta placa de Si na segunda irradiação evidenciando a ausência de pico .....	45

2.22 Região de 1274 keV referente à quinta placa de Si na segunda irradiação evidenciando a ausência de pico .....	45
2.23 Região de 1274 keV referente à sexta placa de Si na segunda irradiação evidenciando a ausência de pico .....	45
2.24 Ajuste realizado para o pico de 1274 keV no espectro do magnésio .....	48
2.25 Ajuste do pico de 372 keV proveniente do $^{43}\text{Sc}$ .....	50
2.26 Ajuste do pico de 271 keV proveniente do $^{44\text{m}}\text{Sc}$ ( $t_{1/2} = 2,4$ d) .....	50
2.27 Ajuste do pico de 1499 keV (segundo pico, o primeiro pico corresponde ao empilhamento e soma do 983 e 511 keV) proveniente do $^{44\text{g}}\text{Sc}$ ( $t_{1/2} = 3,9$ h) .....	51
2.28 Ajuste do pico de 889 keV proveniente do $^{46\text{g}}\text{Sc}$ .....	51
2.29 Ajuste do pico de 159 keV proveniente do $^{47}\text{Sc}$ .....	52
2.30 Ajuste do pico de 1037 keV proveniente do $^{48}\text{Sc}$ .....	52
2.31 Região de 1525 keV referente à placa de Ti evidenciando a ausência de pico .....	53
3.1 Seções de choque para formação de $^{22}\text{Na}$ a partir do $^{29}\text{Si}$ .....	54
3.2 Seções de choque para formação de $^{22}\text{Na}$ a partir de silício natural [Fu71] .....	55
3.3 Função de excitação para produção de $^{22}\text{Na}$ a partir do magnésio .....	56
3.4 Função de excitação para produção de $^{22}\text{Na}$ a partir do magnésio próximo às energias de interesse [Fu71] .....	58
3.5 Função de excitação para a reação $\text{Ti}(p, 2pxn)^{48}\text{Sc}$ . As barras de incerteza deste trabalho são da dimensão do ponto no gráfico .....	60
3.6 Função de excitação para a reação $\text{Ti}(p, 2pxn)^{47}\text{Sc}$ . As barras de incerteza deste trabalho da energia são da dimensão do ponto no gráfico .....	60
3.7 Função de excitação para a reação $\text{Ti}(p, 2pxn)^{46\text{m+g}}\text{Sc}$ . As barras de incerteza deste trabalho da energia são da dimensão do ponto no gráfico .....	61
3.8 Função de excitação para a reação $\text{Ti}(p, 2pxn)^{44\text{g}}\text{Sc}$ . As barras de incerteza deste trabalho da energia são da dimensão do ponto no gráfico .....	61
3.9 Função de excitação para a reação $\text{Ti}(p, 2pxn)^{44\text{m}}\text{Sc}$ . As barras de incerteza deste trabalho da energia são da dimensão do ponto no gráfico .....	62
3.10 Função de excitação para a reação $\text{Ti}(p, 2pxn)^{43}\text{Sc}$ . As barras de incerteza deste trabalho são da dimensão do ponto no gráfico .....	62

## Capítulo 1

### Introdução

O estudo de reações induzidas por prótons com energias próximas ao limiar de ocorrência da reação e que apresentam um valor reduzido para a seção de choque é bastante escasso na literatura. Algumas dessas reações, ( $p, 2\alpha$ ), ( $p, 2p$ ), ( $p, {}^3He$ ) e ( $p, p\alpha$ ), podem ser estudadas por atividade residual com prótons de energia limitada desde que uma série de requisitos seja levada em conta. O limiar destas reações, desde que o nuclídeo alvo seja relativamente leve, corresponde a energias na faixa de 10 MeV. Reações ( $p, 2\alpha$ ) podem ainda se tornar exoenergéticas para nuclídeos com número de massa  $A = 100$  (fora do objetivo deste trabalho), reações ( $p, p\alpha$ ) seguem o balanço energético do decaimento  $\alpha$ . Dados experimentais inadequados ou com baixa precisão motivaram o presente trabalho que busca estabelecer alguns procedimentos otimizados em condições experimentais difíceis.

Resultados de seções de choque têm aplicações em diversos campos das ciências básicas e aplicadas (estudo de raios cósmicos solares e galácticos, desenvolvimento de tecnologia espacial, construção de aceleradores, proteção radiológica, radioterapia [Bo93][Mi86][Mi97][Sh68][La83][Si97]). A determinação de seções de choque em energias próximas ao limiar permitem ainda uma maior compreensão acerca da formação do núcleo composto [Co56][Re54][Co54] e da existência de estruturas ou aglomerados (“clusters”) [Ta99] no interior dos núcleos. Estruturas mais complexas em núcleos mais pesados, apesar de corresponderem a procedimentos experimentais delicadíssimos, foram definitivamente estabelecidas há muito tempo. A publicação Barwick et al. [Ba85] demonstrando claramente a emissão de nuclídeos  ${}^{24}Ne$  no  ${}^{232}U$  ( ${}^{232}U \rightarrow {}^{24}Ne + {}^{208}Pb$ ) foi um marco fundamental no conceito.

Reações ( $p, 2\alpha$ ), em geral estudadas em energias mais elevadas, apresentam resultados insuficientes em energias próximas ao limiar. A situação é compreensível levando-se em conta a magnitude das seções de choque envolvidas, da ordem de

microbarn ou menos, e possíveis interferências de eventuais impurezas que poderiam tornar os resultados ambíguos e de baixa qualidade. Neste trabalho procurou-se estabelecer possibilidades e dificuldades de atingir um objetivo mais geral através do estudo de um caso relativamente favorável associado à obtenção de outros resultados. No caso particular do estudo da reação  $^{29}\text{Si}(\text{p}, 2\alpha)^{22}\text{Na}$ , a linha característica de 1274 keV associada a uma meia-vida longa permite uma identificação única do nuclídeo produzido.

Nuclídeos de meias-vidas longas são interessante em situações nas quais impurezas de meia-vida curta podem estar presentes. No caso da reação  $^{57}\text{Ni}(\text{p}, 2\alpha)^{54}\text{Mn}$  ( $t_{1/2} = 314$  d) a medida é possível, mas não imediatamente após a irradiação, pois a presença de  $^{56}\text{Co}$  ( $t_{1/2} = 77$  d) e  $^{58}\text{Co}$  ( $t_{1/2} = 71$  d), formados em maior proporção, é altamente perturbadora. Muitas vezes porém, estes nuclídeos de meias-vidas longas possuem energias muito baixas ou não emitem gamas ou possuem ainda uma meia-vida excessivamente longa que torna a intensidade da atividade produzida muito difícil de se medir. Exemplos:  $^{33}\text{S}(\text{p}, 2\alpha)^{26}\text{Al}$  ( $t_{1/2} = 0,7 \times 10^6$  a),  $^{43}\text{Ca}(\text{p}, 2\alpha)^{36}\text{Cl}$  ( $t_{1/2} = 0,3 \times 10^6$  a) e  $^{47}\text{Ti}(\text{p}, 2\alpha)^{40}\text{K}$  ( $t_{1/2} = 1,3 \times 10^9$  a).

Reações ( $\text{p}, \alpha$ ) e ( $\text{n}, \alpha$ ) tem em geral seções de choque mais elevadas, atingindo, para nuclídeos leves ( $A < 100$ ), valores da ordem de dezenas de milibarns em energias ao redor de 15 MeV. Este resultado, grosso modo, se explica devido ao fato de que as reações citadas são em muitos casos exoenergéticas e em condições físicas de barreira Coulombiana não muito elevada a emissão  $\alpha$  compete bastante bem com a emissão de partículas. Dados de reações ( $\text{p}, 2\alpha$ ) indicam seções de choque que possuem valores máximos da ordem de dezenas de milibarn com energias de prótons em torno de 50 MeV, estes dados têm a mesma ordem de grandeza das reações ( $\eta, \alpha$ ) [ $\eta = \text{p}, \text{n}$ ], e pressupõe mecanismos de emissão com mais canais disponíveis.

A escolha de casos típicos possíveis é um processo complexo, perturbado ainda pela presença inevitável de impurezas que acompanham em maior ou menor proporção alguns elementos. A atividade preferencial induzida pela reação em questão pode ter

sua medida dificultada pela produção de outras atividades de seção de choque ordens de grandeza maiores, podendo necessitar de radioquímica, ou ainda, tornar necessária medida ou medidas em um âmbito mais sistemático para elaboração de conclusões mais fundamentadas. A limitação de energia do feixe de prótons do ciclotron do *IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares)* 24 MeV e reações parasitas produzidas por nêutrons (gerados em grande proporção em máquinas do tipo ciclotron) são outros fatores que adicionam dificuldades às já mencionadas.

A determinação da seção de choque para a formação de elementos provenientes de nuclídeos com um número atômico aproximadamente menor que 20 e utilizando energias não muito afastadas do limiar de ocorrência da reação permite através da análise de solo lunar [Si97] (constituído basicamente, em ordem decrescente de abundância, por oxigênio, silício, alumínio, ferro cálcio, magnésio e titânio) uma maior compreensão acerca do fluxo dos raios cósmicos solares (SCR - Solar Cosmic Rays). A tabela 1.1 mostra os principais elementos encontrados no solo lunar.

Radionuclídeo	Meia-vida (a)	Principais alvos
<sup>37</sup> Ar	0,096	Ca, K
<sup>56</sup> Co	0,213	Fe
<sup>54</sup> Mn	0,855	Fe
<sup>22</sup> Na	2,6	Mg, Al, Si
<sup>55</sup> Fe	2,7	Fe
<sup>3</sup> H	12,3	O, Mg, Si, Fe
<sup>14</sup> C	5730	O, Mg, Si, Fe
<sup>59</sup> Ni	$7,6 \times 10^4$	Fe
<sup>41</sup> Ca	$1,0 \times 10^5$	Ti, Ca, K
<sup>81</sup> Kr	$2,1 \times 10^5$	Sr, Zr, Y
<sup>36</sup> Cl	$3,0 \times 10^5$	Ca, K
<sup>26</sup> Al	$7,1 \times 10^5$	Si, Al, Mg
<sup>10</sup> Be	$1,5 \times 10^6$	O, Mg, Si, Fe
<sup>53</sup> Mn	$3,7 \times 10^6$	Fe

Tab. 1.1 - Radionuclídeos usualmente utilizados para o estudo de raios cósmicos solares [Re91].

A análise dos nuclídeos formados a partir dos elementos acima fornece uma quantificação do fluxo de prótons proveniente de explosões solares (os raios cósmicos solares possuem energias, aproximadamente, maiores que 10 MeV e são constituídos

basicamente por prótons, vide Fig. 1.1). A baixa energia dos raios cósmicos solares faz com que eles tenham um pequeno alcance na superfície dos meteoritos. Esta superfície é queimada quando o meteorito entra na atmosfera terrestre, desta forma a análise dos raios cósmicos solares fica dificultada a partir de amostras de meteoritos [Br71].

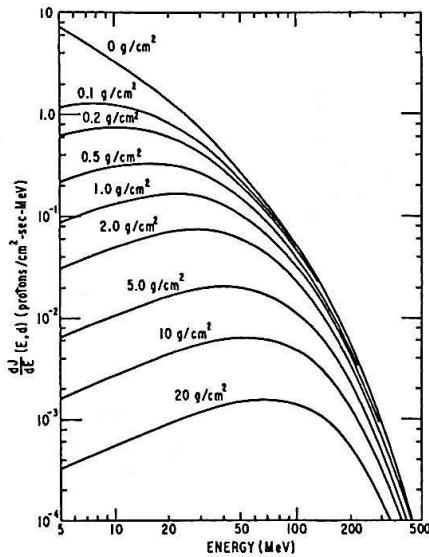


Fig. 1.1 - Distribuição do fluxo vs. energia de prótons solares em função da profundidade na lua [Re91].

O silício, em particular o nuclídeo  $^{29}\text{Si}$  (4,67(1) %), irradiado com prótons de energia de 24 MeV produz como produto final o nuclídeo  $^{22}\text{Na}$  (meia-vida de 2,602 anos) este proveniente da reação  $^{29}\text{Si}(\text{p}, 2\alpha)^{22}\text{Na}$  ( $Q = -14273,7(5)$  keV [Fi96]). O  $^{22}\text{Na}$  decai por captura eletrônica (99,962% para o estado excitado  $2^+$  e 0,038% para o estado fundamental  $0^+$  do  $^{22}\text{Ne}$ ) e sua identificação pode ser feita através da transição gama característica de 1274 keV. O mesmo nuclídeo produz, também, outro produto de interesse ( $^{26}\text{Al}$ ), este proveniente em maior proporção da reação  $^{29}\text{Si}(\text{p}, \alpha)^{26}\text{Al}$  ( $Q = -4,8210(10)$  keV [Fi96]), já que as outras reações, porventura formadoras do  $^{26}\text{Al}$ , apresentam  $Q$  em valor absoluto muito maior (da ordem de 15 MeV). A produção de  $^{26}\text{Al}$  com atividades apreciáveis é um procedimento difícil devido à meia-vida do estado fundamental deste nuclídeo ( $t_{1/2} = 0,7$  Ma). Deve-se ressaltar o fato de que a determinação da seção de choque da reação  $^{29}\text{Si}(\text{p}, \alpha)^{26}\text{Al}$  nunca foi efetuada por

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

meio da medida da atividade residual do  $^{26}\text{Al}$ . Este nuclídeo apresenta uma linha característica facilmente identificável, 1809 keV, e de medida possível mesmo com baixa estatística por se localizar numa região relativamente “limpa” do espectro. Em diversos artigos a medida do  $^{26}\text{Al}$  é feita utilizando-se espectroscopia de massa [Fu71][Ta67][Mi96][Sc87][Br78].

Os esquemas de decaimento dos produtos citados acima,  $^{22}\text{Na}$  e  $^{26}\text{Al}$ , são mostrados nas Figuras 1.2 e 1.3:

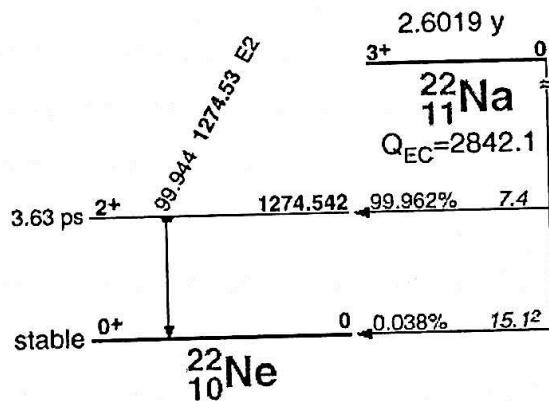


Figura 1.2 - Esquema de decaimento do  $^{22}\text{Na}$   
[Fi96a].

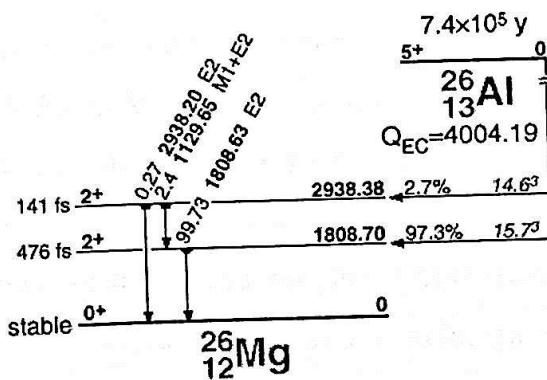


Figura 1.3 - Esquema de decaimento do  $^{26}\text{Al}$   
[Fi96a].

O silício representa, ainda, papel fundamental na tecnologia espacial. Embora o fluxo de raios cósmicos na Terra seja muito menor do que o fluxo existente no espaço (o fluxo de prótons de energias entre 10 e 100 MeV passa de aproximadamente  $1,2 \times 10^{-5}$  a  $7,0 \times 10^{-7}$  prótons/cm<sup>2</sup>sMeV quando se vai de 10 a 3 km de altitude [Zi79],

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

respectivamente) algumas interações de raios cósmicos com componentes eletrônicos utilizados em memórias de computador, vários deles feitos de silício (CCD - charge-coupled devices, d-RAM - dynamic random access memory), podem ocasionar algumas falhas de sistema em satélites [Ma83][Wa62].

Outro elemento interessante no estudo de raios cósmicos solares e galácticos é o titânio. O titânio está presente em até 7 % em algumas rochas lunares e é o principal formador de  $^{48}\text{V}$  e  $^{46}\text{Sc}$  na superfície lunar [Mi78].

Outros elementos também são formados a partir do titânio. A origem principal do  $^{41}\text{Ca}$  no solo lunar é o titânio [Fi90], concorrendo com outras duas reações que contribuem para a sua formação (a interação de raios cósmicos galácticos com o ferro produz o  $^{41}\text{Ca}$  por “spallation” e a captura de nêutrons pelo  $^{40}\text{Ca}$  (97 %) existente no solo lunar). A produção de  $^{36}\text{Cl}$  a partir do titânio também é um processo possível [Sc96]. Medidas de seção de choque para energias mais elevadas mostram-se da ordem de mb. Evidentemente a detecção tanto do  $^{41}\text{Ca}$  quanto do  $^{36}\text{Cl}$  exigem procedimentos sofisticados, já que ambos não emitem gamas.

Além do silício e titânio outro elemento escolhido para as medidas é o magnésio. O nuclídeo  $^{25}\text{Mg}$  também produz o  $^{22}\text{Na}$  proveniente da reação  $^{25}\text{Mg}(\text{p},\alpha)^{22}\text{Na}$  ( $Q = -3146,5(5)$  keV [Fi96]), a observação dessa reação é bastante favorecida devido à energia de 24 MeV do feixe de prótons do IPEN (possui uma energia bem acima do limiar da reação) e a seção de choque da reação que para essa energia é da ordem de dezenas de mb. Essa reação pode fornecer alguma informação sobre o mecanismo de saída da segunda partícula alfa, já que o núcleo composto formado ( $^{26}\text{Al}$ ) é também o núcleo residual após a emissão da partícula  $\alpha$  do  $^{30}\text{P}^*$  ( $\text{p} + ^{29}\text{Si}$ ).

Como o  $^{22}\text{Na}$  consiste em um dos elementos de interesse deve-se ter um cuidado especial no manuseio das amostras a serem irradiadas, já que a presença do  $^{23}\text{Na}$  no suor, e consequente formação de  $^{22}\text{Na}$ , poderia estar interferindo nos resultados das medidas. Uma estimativa do  $^{23}\text{Na}$  contido no interior das amostras de silício foi feita

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

---

através de uma irradiação com nêutrons no reator do IPEN. A estimativa é feita através da detecção do  $^{24}\text{Na}$  ( $t_{1/2} = 14,659(4)$  h [Br78]) pelas suas linhas características de 1368 e 2753 keV.

As medidas realizadas compreenderam:

- i) Determinação da seção de choque da reação  $^{29}\text{Si}(p, 2\alpha)^{22}\text{Na}$ , utilizando lâminas fornecidas pelo Laboratório de Microeletrônica da Poli. Estas medidas foram feitas do limiar até, aproximadamente, 22 MeV. Apesar de ter sido utilizado o Si natural, na faixa de energia possível a reação  $^{29}\text{Si}(p, 2\alpha)^{22}\text{Na}$  seria a única com seção de choque significativa.
- ii) Medida exploratórias da seção de choque da reação  $^{49}\text{Ti}(p, 2\alpha)^{42}\text{K}$
- iii) Medida da reação  $\text{Mg}(p, X)^{22}\text{Na}$

O capítulo 2 contém uma descrição detalhada do procedimento experimental utilizado e os dados obtidos através da espectroscopia simples dos elementos irradiados. Esse capítulo também faz uma descrição do tratamento estatístico utilizado, onde são consideradas as covariâncias tanto no ajuste das funções de calibração como nas propagações de incertezas. Um cálculo para a quantidade de impureza de  $^{23}\text{Na}$  contida na amostra de silício também é feito nesse capítulo. A obtenção da seção de choque para as reações de interesse e a discussão dos resultados são descritas no capítulo 3. No capítulo 4 são feitas as conclusões do trabalho.

## Capítulo 2

### Método Experimental

#### 2.1 Considerações Preliminares

Reações ( $p, 2\alpha$ ), objeto das medidas, foram relativamente bem estudadas em energias mais elevadas, situação em que as seções de choque possuem ordem de grandeza de dezenas de milibarns. Em energias próximas de 20 MeV o valor da seção de choque é muito menor e cuidados especiais devem ser tomados com as medidas:

- i) Amostras com o maior grau de pureza possível
- ii) Por se tratar de uma região em que  $d\sigma/dE$  varia acentuadamente a determinação da energia do feixe de prótons incidente necessita de um grau elevado de precisão
- iii) Escolha adequada do nuclídeo final produzido na reação

Mesmo com procedimentos otimizados podem ocorrer problemas. Um deles, claramente demonstrado nas medidas, foi a presença de radioatividades induzidas (que não chegaram a interferir nas medidas) proveniente de impurezas. Nas medidas relacionadas ao Si, radioatividades provenientes de impurezas introduzidas no próprio procedimento de preparação das amostras puderam ser constatadas na proporção de ppm (partes por milhão). Os nuclídeos, de meia-vida curta, provenientes das impurezas possuem uma seção de choque de formação muito mais alta que a reação de interesse (conforme mostrado adiante, a presença de Fe em 1 ppm produz o  $^{56}\text{Co}$  que devido à meia-vida, porcentagem isotópica, coeficiente de eficiência e seção de choque possui um pico com a mesma ordem de grandeza que a linha característica do  $^{22}\text{Na}$ , nuclídeo de interesse).

Na medida da reação  $^{29}\text{Si}(p, 2\alpha)^{22}\text{Na}$  as transições gama envolvidas são a linha característica de 1274 keV e o gama de aniquilação de 511 keV. Este último

dificilmente poderia ser utilizado, no presente experimento, para se determinar sem ambigüidade o produto final  $^{22}\text{Na}$ .

Os procedimentos relacionados às medidas de espectroscopia gama simples foram muito cuidadosos, desde a avaliação do fundo presente na sala onde se encontrava o detector utilizado até o uso de blindagens de chumbo apropriadas. Uma determinação cuidadosa da curva de calibração de energia e eficiência foi realizada com o uso de fontes padrão calibradas.

O ritmo de contagens que se observa na parte mais significativa do espectro é de algumas contagens por minuto ou menos. Os ajustes das áreas dos picos foram feitos mediante diferentes programas desenvolvidos no laboratório, *Idefix* e *Obelix* [Go82][Go82a]. As medidas ocorreram em situação perfeitamente satisfatória de estabilidade de energia, não ocorrendo alargamento anormal da largura a meia altura dos picos.

## 2.2 Produção das fontes

Foram irradiadas com prótons, no Ciclotron do *IPEN*, duas séries de placas silício. Na primeira série, exploratória, foram irradiadas 6 placas de silício de 0,2 mm de espessura e  $100\text{ mm}^2$ , na segunda foram irradiadas 8 placas de 0,5 mm de espessura e  $100\text{ mm}^2$ . Em ambas as séries utilizou-se o método de “stacked-foil”. Irradiou-se também uma folha de titânio de 0,05 mm de espessura e  $100\text{ mm}^2$ . O magnésio irradiado foi em forma de fita de espessura 0,2 mm e uma largura de 3 mm. Para que todo o feixe de prótons fosse utilizado foram colocadas três fitas dispostas uma ao lado da outra de forma a somar uma largura de 9 mm.

O feixe de prótons do *IPEN* possui uma energia nominal inicial de 24 MeV. Um colimador de 8 mm de diâmetro foi utilizado de forma a concentrar o feixe de prótons no centro das amostras. O tempo de irradiação das amostras foi calculado para que a corrente integrada do feixe ficasse em torno de 3  $\mu\text{Ah}$  nas irradiações do silício e

magnésio e  $0,5 \mu\text{Amin}$  na irradiação do titânio (para evitar a alta atividade da amostra proveniente do  $^{48}\text{V}$  e  $^{46}\text{Sc}$ ).

Para a monitoração da energia e da corrente integrada do feixe de prótons foi utilizada uma folha de cobre de 0,05 mm de espessura colocada na frente das placas de silício, da folha de titânio e da fita de magnésio. Este procedimento será detalhado na seção 2.6.

A determinação da quantidade de folhas de silício a serem utilizadas foi determinada através de um cálculo teórico feito pelo programa TRIM (Transport of Ions in Matter) [Zi85]. Este programa, através de uma simulação utilizando o método de Monte Carlo, calcula o alcance de íons na matéria. Uma figura referente ao alcance dos prótons nas placas de silício é mostrado na Figura 2.1:

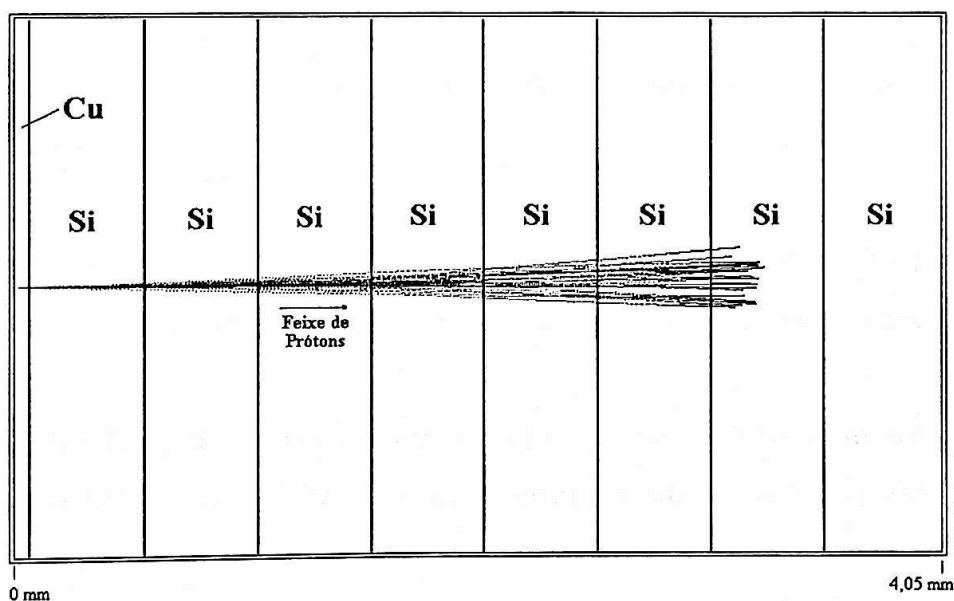
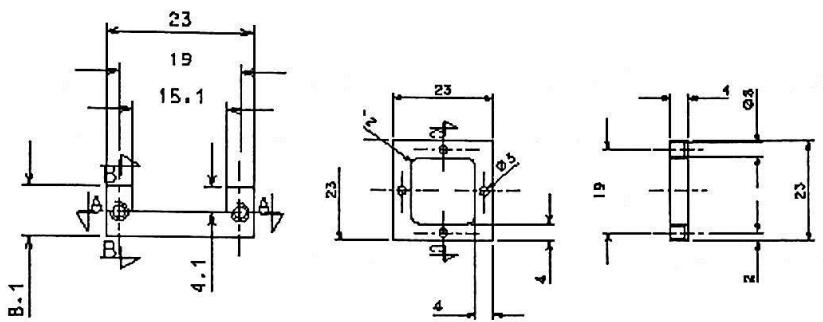
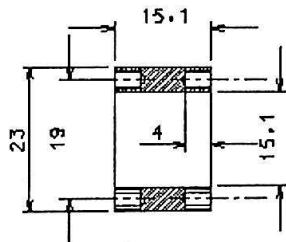


Fig. 2.1 - Simulação da entrada de 30 prótons de 24 MeV na folha de cobre (monitor) e nas placas de silício feito pelo programa TRIM [Zi85].

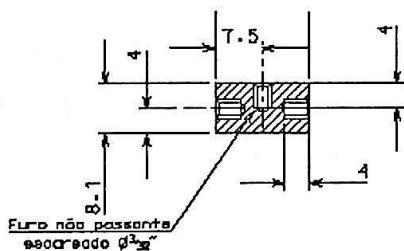
Para evitar a quebra das placas de silício devido à pressão mecânica exercida pelo “porta-amostras” do ciclotron foi construído um recipiente de latão para acondicionar o silício. A Figura 2.2 mostra os desenhos técnicos do recipiente do silício:



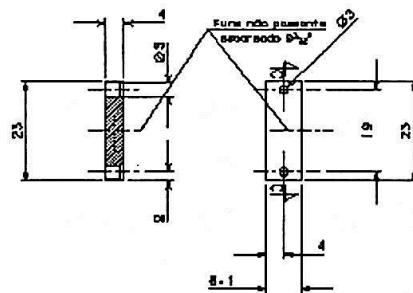
Vista lateral



Corte A - A



Corte B - B



Corte C - C

Vista superior

Fig.2.2 - Projeto do recipiente das amostras de silício.

Foi tomado um cuidado especial no manuseio das amostras de forma a evitar a contaminação por sódio, presente no suor, que poderia interferir nas medidas do  $^{22}\text{Na}$ .

Foi feita também uma irradiação de 114 mg de silício com um fluxo de  $10^{13}$  nêutrons/cm $^2$ s no reator do IPEN para determinar a quantidade de impureza de  $^{23}\text{Na}$  contida na amostra de silício. O silício utilizado tanto no ciclotron como no reator foi da mesma procedência. O método para determinar a quantidade de sódio será descrito na seção 2.8.

Procedimentos mais simplificados foram utilizados nas irradiações do titânio e do magnésio. Para o titânio irradiou-se apenas uma folha de titânio de 0,05 mm de espessura utilizando novamente uma folha de cobre de mesma espessura para monitoração do feixe de prótons. O tempo de irradiação do titânio foi calculado para não formar uma quantidade de  $^{48}\text{V}$  e  $^{46}\text{Sc}$  que impossibilitasse o manuseio da amostra

(as reações  $Ti(p, xn)^{48}V$  e  $Ti(p, pxn)^{46}Sc$  são bastante favorecidas na energia de 24 MeV). O magnésio utilizado, conforme já foi citado, foi em forma de fita de espessura

0,2 mm e uma largura de 3 mm e para que todo o feixe de prótons fosse utilizado foram colocadas três fitas dispostas uma ao lado da outra de forma a somar uma largura de 9 mm (foi utilizado um colimador de 8 mm de diâmetro para o feixe), uma folha de cobre também foi colocada na frente das folhas para monitoração do feixe de prótons.

### 2.3 Sistema de Aquisição

Para aquisição de dados foi utilizado um detector de germânio hiper-puro *HPGe ORTEC* (modelo número GEM 30185-P, número de série 34-TP30930A) de 2000 V, com volume de 162 cm<sup>3</sup> e resolução de 1,69 keV para a linha de 1332 keV do <sup>60</sup>Co.

O sinal produzido no detector é inicialmente amplificado pelo seu pré-amplificador e em seguida por um amplificador *ORTEC 572*, o amplificador é conectado a um conversor analógico digital (*CAD*) e este finalmente é conectado à placa *REGULUS* [Ma96] localizada em um computador.

Um esquema simplificado do sistema utilizado para aquisição é apresentado a seguir:

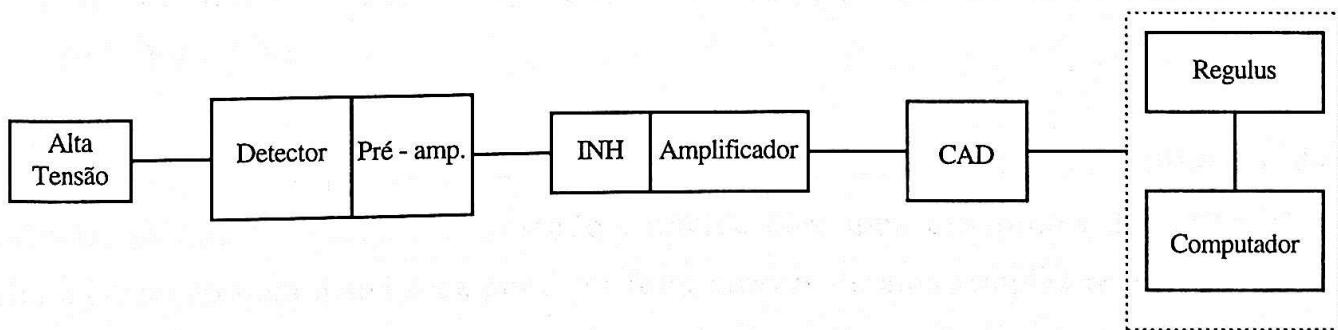


Figura 2.3 - Modelo simplificado do sistema de aquisição utilizado.

O ganho do amplificador foi ajustado para cobrir uma faixa de energia (até 3000 keV) que fosse compatível com as linhas a serem observadas.

## 2.4 Calibrações Iniciais

Devido à diferença de atividade entre as amostras irradiadas foram necessárias três calibrações de eficiência em três distâncias diferentes: para a medida do cobre foi adotada uma distância de, aproximadamente, 20 cm do detector. O silício, devido à reduzida atividade (da ordem de kBq), foi medido encostado no detector. O titânio e o magnésio foram medidos a 25 cm do detector.

Para a calibração de energia foram utilizadas fontes de  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{57}\text{Co}$  e  $^{207}\text{Bi}$  de forma a cobrirem todas as regiões de interesse do espectro (0 a 3000 keV aproximadamente).

Para a calibração de eficiência próxima ao detector foi utilizada uma fonte de  $^{152}\text{Eu}$  de baixa atividade (6,73(10) kBq), devido, porém, à proximidade da fonte com o detector foi necessária uma correção de soma para que a curva de calibração pudesse fornecer um valor para o  $\chi^2$  dentro do aceitável ( $5\% < P(\chi^2) < 95\%$ , onde  $P(\chi^2)$  é a probabilidade do  $\chi^2$  ser excedido). Para a correção de soma foi utilizado o programa KORSUM [De88] que será descrito na seção 2.5. Para distância de 20 cm foram utilizadas as fontes de  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{88}\text{Y}$  e  $^{54}\text{Mn}$  e para 25 cm foram utilizadas as fontes de  $^{152}\text{Eu}$  e  $^{22}\text{Na}$ .

No caso da correção para a área do pico do  $^{22}\text{Na}$  não se utilizou a calibração de eficiência, já que o elemento em estudo coincide com uma das fontes de calibração. Assim a correção para a sua área pode ser feita através de uma simples regra de três.

Os picos dos espectros foram ajustados utilizando o programa *Idefix* [Go82]. Uma listagem inicial dos picos existentes no espectro foi dada pelo programa *Obelix* [Go82a]. O programa *Idefix* ajusta os picos utilizando o método dos mínimos quadrados, cada pico ajustado consiste de uma gaussiana onde pode ser somado a ela

uma função degrau, uma função polinômio do segundo grau e uma cauda exponencial à esquerda. O programa fornece como dados de saída a amplitude do pico, a posição do centróide, a largura a meia altura (FWHM), a altura do degrau e o valor da junção da cauda exponencial (quando for escolhida a opção de soma de degrau e cauda exponencial), o valor calculado da energia em que se encontra o pico e a área do pico. O programa ainda possui a opção de subtração do espectro de fundo.

Devido ao baixo número de contagens encontrado nos fotópicos analisados a função utilizada consistiu em uma gaussiana simples. Com o aumento do número de contagens a probabilidade de se ter um bom ajuste utilizando uma gaussiana sem complementos vai diminuindo, desta forma o limite, determinado empiricamente, onde deve ser somada uma função degrau e uma exponencial encontra-se em  $10^4$  contagens no pico [Tr97].

Para o ajuste da função quadrática referente à calibração de energia foi utilizado o método dos mínimos quadrados. O ajuste fornece os parâmetros e a sua matriz de covariância.

O ajuste da eficiência foi feito utilizando-se uma função polinomial [De88]

$$\ln \varepsilon = \sum_{i=0}^n a_i \left( \ln \left( \frac{E}{E_B} \right) \right)^i \quad (2.1)$$

onde  $\varepsilon$  é a eficiência,  $a$  são os parâmetros ajustados,  $E$  é a energia e  $E_B$  é uma energia escolhida para que os valores não-diagonais da matriz de covariância estejam em torno de zero. Uma descrição mais detalhada do procedimento utilizado para a calibração de eficiência será feito na seção 2.5.

## 2.5 Calibração de Energia

Inicialmente será feita uma breve apresentação do método covariante [He81] [Va98] utilizado para a calibração de energia e eficiência. Seja um conjunto de dados  $(E_i, X_i)$ ,  $i = 0, 1 \dots n$ , correspondentes, respectivamente, à energia do fotópico e ao canal associado a essa energia. A calibração consiste no ajuste dos parâmetros  $a_i$  da função polinomial  $E(X) = \sum_{j=0}^m a_j X^j$  que melhor representa o conjunto de dados.

Utilizando uma representação matricial:

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & X_1 & \cdots & X_1^m \\ 1 & X_2 & \cdots & X_2^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_n & \cdots & X_n^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_0 \\ e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix}$$

escrevendo de uma forma compacta:

$$\mathbf{E} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{e} \quad (2.2)$$

onde  $\mathbf{e}$  é o erro que se comete na estimativa de  $\mathbf{E}$ .

Os parâmetros ajustados  $\tilde{\mathbf{A}}$  são dados pela equação seguinte, escrita sob forma matricial:

$$\tilde{\mathbf{A}} = (\mathbf{X}^t \cdot \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^t \cdot \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{E} \quad (2.3)$$

onde  $\mathbf{V}$  é a matriz de covariância de  $\mathbf{E}$ .

A matriz de covariância de  $\tilde{\mathbf{A}}$  é dada por:

$$\tilde{\mathbf{V}}_{\tilde{\mathbf{A}}} = (\mathbf{X}^t \cdot \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{X})^{-1}. \quad (2.4)$$

A qualidade de ajuste da função é dada pelo  $\chi^2$ , com  $m-n$  graus de liberdade:

$$\chi^2 = (\mathbf{E} - \mathbf{X} \cdot \tilde{\mathbf{A}})' \cdot \mathbf{V}^{-1} \cdot (\mathbf{E} - \mathbf{X} \cdot \tilde{\mathbf{A}}). \quad (2.5)$$

A calibração inicial de energia em função do número do canal foi feita utilizando-se as fontes citadas em 2.3 (os valores das energias das linhas características das fontes de calibração foram retirados da tabela da *International Atomic Energy Agency* [In91]). Com exceção da fonte  $^{152}\text{Eu}$  medida por 1 hora as outras fontes foram colocadas por 10 minutos. Devido à quantidade de linhas apresentadas pelo  $^{152}\text{Eu}$  é necessário um tempo maior para que haja uma melhor formação dos picos referentes aos gamas menos intensos. A curva referente a um dos ajustes (foram realizadas várias calibrações de energia), os parâmetros referentes a ela e a matriz de covariância dos parâmetros são apresentados a seguir.

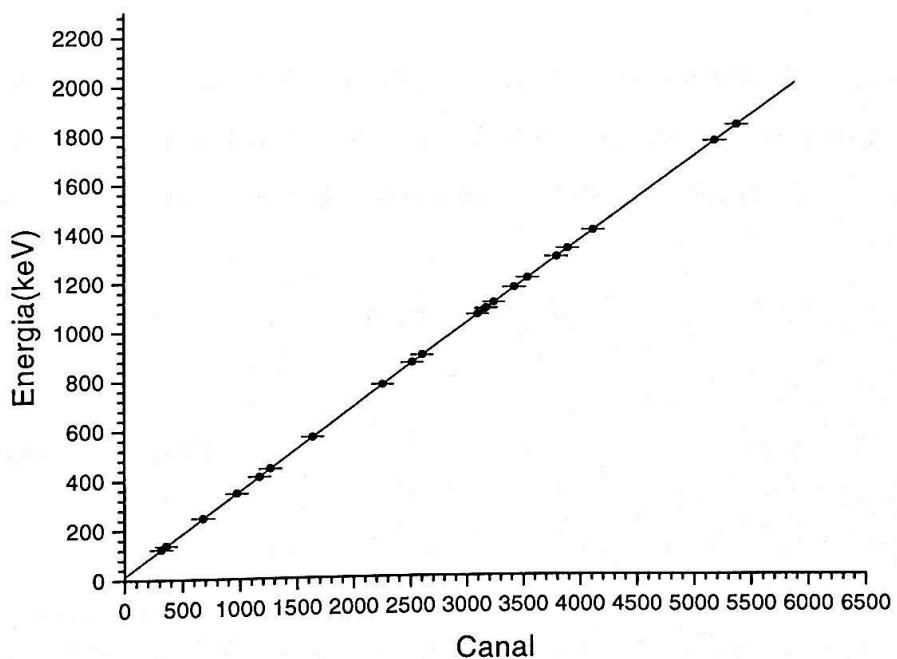


Figura 2.4 - Calibração energia vs. canal.

A curva ajustada, inserida no gráfico, é:

$$E = A + Bx + Cx^2 \quad (2.6)$$

onde  $A = 14,1875(78)$ ,  $B = 0,338618(13)$  e  $C = -1,91(34) \cdot 10^{-8}$ .

A matriz de covariância referente aos parâmetros ajustados é:

$$\mathbf{V}_a = \begin{pmatrix} 6,1106 \cdot 10^{-5} & -8,7624 \cdot 10^{-8} & 1,9507 \cdot 10^{-11} \\ -8,7624 \cdot 10^{-8} & 1,7639 \cdot 10^{-10} & -4,3000 \cdot 10^{-14} \\ 1,9507 \cdot 10^{-11} & -4,3000 \cdot 10^{-14} & 1,1482 \cdot 10^{-17} \end{pmatrix}$$

O ajuste citado forneceu um  $\chi^2 = 13,4$  (77 % de probabilidade de ser excedido) para 18 graus de liberdade.

A partir da curva de calibração obtida é possível, através de um cálculo covariante, obter as energias dos picos do espectro a ser analisado.

Considerando-se um dado qualquer  $X$ , correspondente à posição do pico, a determinação da energia é feita substituindo-se diretamente o valor de  $X$  na equação (2.6), a variância referente à energia calculada pode ser obtida por:

$$\sigma_E^2 = \mathbf{F}' \cdot \mathbf{V}'_a \cdot \mathbf{F} \quad (2.7)$$

onde  $\mathbf{F}'$  e  $\mathbf{V}'_a$  são dados por:

$$\mathbf{F}' = (1 \quad X \quad X^2 \quad B + 2CX)$$

$$\mathbf{V}'_a = \begin{pmatrix} & & & 0 \\ & \mathbf{V}_a & & 0 \\ & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_x^2 \end{pmatrix}$$

$\sigma_x^2$  é a variância associada à posição do pico (fornecida pelo programa *Idefix* ao fazer o ajuste) o preenchimentos da linha e coluna por zeros deve-se ao fato da incerteza da posição do pico não estar correlacionada aos parâmetros da calibração de energia.

## 2.6 Calibração de Eficiência

A intensidade absoluta da transição gama por decaimento,  $p$ , é definida como a razão entre a taxa de emissão da transição gama considerada e a taxa de decaimento do núcleo pai. Ela se relaciona com a área do fotópico do espectro analisado,  $A$ , por:

$$A = N \cdot p \cdot \varepsilon \quad (2.8)$$

onde  $\varepsilon$  é a eficiência do detector para uma determinada geometria e  $N$  é o número de decaimentos do núcleo durante o período de medida  $t$ :

$$N = \int_0^t \alpha \cdot dt \quad (2.9)$$

onde  $\alpha$  é a atividade da fonte. Quando a meia-vida do nuclídeo considerado é muito maior que o tempo de medida podemos aproximar a equação (2.9) por  $N = \alpha \cdot t$ , assim a equação que fornece a eficiência para uma determinada energia é:

$$\varepsilon(E) = \frac{A(E)}{I(E) \cdot \alpha \cdot t} \quad (2.10)$$

Para a curva de eficiência ajustou-se a função polinomial (2.1) até segundo grau utilizando o método dos mínimos quadrados [Tr99].

$$\ln \varepsilon(E) = a_0 + a_1 \ln\left(\frac{E}{E_B}\right) + a_2 \ln^2\left(\frac{E}{E_B}\right) \quad (2.1a)$$

Os procedimentos para o ajuste são análogos àqueles utilizados para a calibração de eficiência ( $X$  é substituído por  $\ln(E/E_B)$ ), já que ambas as funções ajustadas são polinômios de segunda ordem. Porém, a matriz de covariância dos dados não é diagonal, pois, no caso de picos provenientes da mesma fonte, a atividade da fonte é fator de covariância entre as diversas eficiências.

Os elementos não-diagonais da matriz de covariância  $V_{ij}$  dos dados são dados por:

$$V_{ij, i \neq j} = \left( \frac{\sigma_\alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (2.11)$$

Eventualmente poderia existir uma covariância proveniente das intensidades dos gamas, estas, porém, não são encontradas na literatura e foram consideradas como sendo nulas [Ve93]. A covariância entre diferentes fontes é nula.

A variância dada pela equação (2.7) não fornece, diretamente, a variância da eficiência, mas  $\left( \frac{\sigma_{\epsilon(E)}}{\epsilon(E)} \right)^2$ . A eficiência, porém, é facilmente calculada substituindo a energia em (2.1a).

Foram feitas três calibrações de eficiência, uma para a geometria utilizada na medição da folha de cobre, outra utilizada na medição do magnésio e titânio e outra utilizada na medição do silício. A primeira calibração foi feita a uma distância de, aproximadamente, 20 cm do detector. A segunda foi feita a uma distância de 25 cm e a terceira foi feita “encostada” no detector devido à baixa atividade da fonte de silício.

Na primeira calibração (20 cm de distância do detector) foram utilizadas fontes de  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$  e  $^{88}\text{Y}$ , onde foram consideradas somente as energias de interesse para o experimento.

A curva de eficiência para uma distância de 20 cm fonte-detector, Figura 2.5, os parâmetros da curva e a sua matriz de covariância são mostrados a seguir.

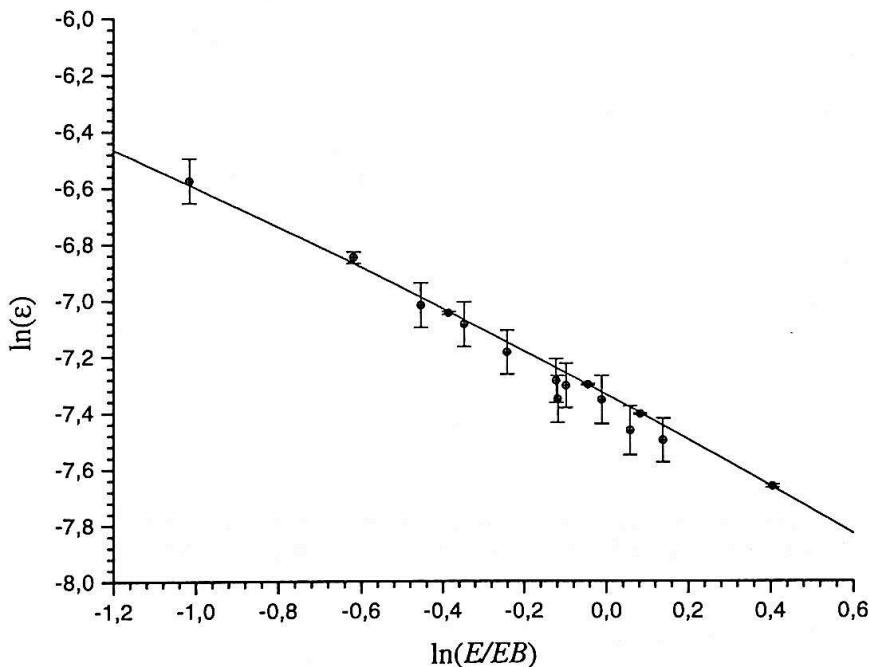


Figura 2.5 - Calibração de eficiência vs. energia para o cobre feita a uma distância de 20 cm fonte-detector.

Os parâmetros ajustados referentes à equação 2.1a foram ( $E_B = 1225$  keV):  $a_0 = -7,32763(32)$ ,  $a_1 = -0,7956(81)$  e  $a_2 = -0,064(20)$ .

A matriz de covariância dos parâmetros ajustados é dada por:

$$\mathbf{V}_a = \begin{pmatrix} 1,0540 \cdot 10^{-7} & 4,0532 \cdot 10^{-6} & 2,9953 \cdot 10^{-7} \\ 4,0532 \cdot 10^{-6} & 6,5563 \cdot 10^{-5} & -8,7763 \cdot 10^{-8} \\ 2,9953 \cdot 10^{-7} & -8,7763 \cdot 10^{-8} & 4,1773 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}$$

O ajuste produziu um  $\chi^2$  de 7,0 (85% de probabilidade de ser excedido) para 12 graus de liberdade.

A curva de eficiência para uma distância de 25 cm fonte-detector, Figura 2.6, os parâmetros da curva e a sua matriz de covariância são mostrados a seguir.

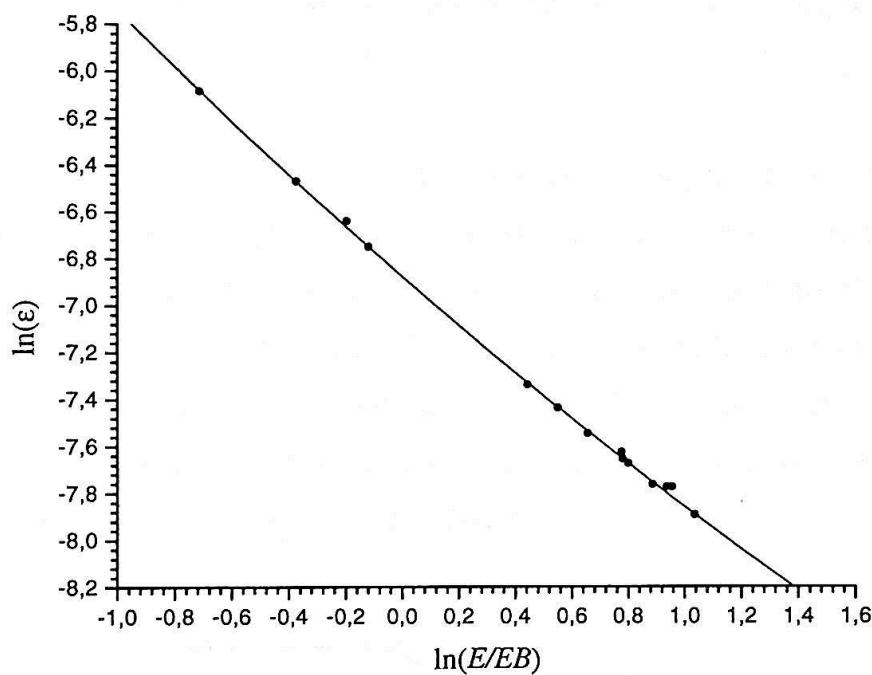


Figura 2.6 - Calibração de eficiência vs. energia para o magnésio e titânio feita a uma distância de 25 cm fonte-detector. As barras de incerteza dos pontos experimentais não foram colocadas pois são muito menores que a escala utilizada em y (0,3 % da menor divisão).

Os parâmetros ajustados referentes à equação 2.1a foram ( $E_B = 500$  keV):  $a_0 = -6,865(30)$ ,  $a_1 = -1,0566(46)$  e  $a_2 = 0,0661(94)$ .

A matriz de covariância dos parâmetros ajustados é dada a seguir:

$$\mathbf{V}_a = \begin{pmatrix} 9,2042 \cdot 10^{-4} & 6,9921 \cdot 10^{-6} & -3,3058 \cdot 10^{-5} \\ 6,9921 \cdot 10^{-6} & 2,1606 \cdot 10^{-5} & -2,7876 \cdot 10^{-6} \\ -3,3058 \cdot 10^{-5} & -2,7876 \cdot 10^{-6} & 8,7752 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}$$

O ajuste produziu um  $\chi^2$  de 17,9 (8,3% de probabilidade de ser excedido) para 11 graus de liberdade.

Na terceira calibração de eficiência (fonte “encostada” ao detector) foi utilizada uma fonte de  $^{152}\text{Eu}$  de 6,73(10) kBq. A fonte foi medida durante 10 minutos. Conforme já foi citado a proximidade da fonte ao detector exige uma correção de soma.

O efeito soma acontece para nuclídeos que emitem dois ou mais fótons em seqüência num tempo menor que o tempo de resolução da eletrônica. A probabilidade de se ter efeitos de soma aumenta com o aumento da eficiência total, ou seja, depende da distância fonte-detector, mas não depende da atividade da fonte. A correção de soma foi feita utilizando-se o programa KORSUM. Uma breve explicação do procedimento utilizado para a correção de soma será feita a seguir utilizando-se um esquema de níveis bastante simplificado [De88]:

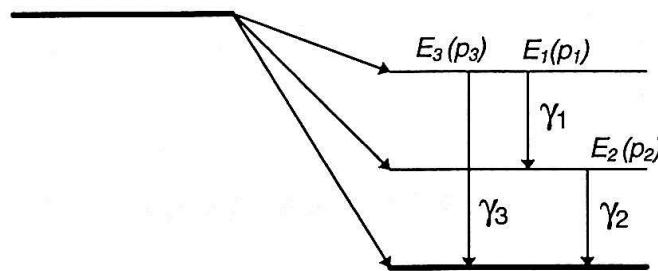


Fig. 2.7 - Esquema de decaimento para explicar o procedimento utilizado na correção de soma.

Na ausência de soma e outras correções a taxa de contagem  $n_{10}$  no pico  $\gamma_1$  é:

$$n_{10} = Ap_I\epsilon_I \quad (2.12)$$

onde  $A$  é a atividade da fonte,  $p_I$  a probabilidade de emissão de  $\gamma_1$  e  $\epsilon_I$  a eficiência de pico na energia  $E_I$ .

Quando  $\gamma_1$  é seguido por  $\gamma_2$  em coincidência surge um pico de energia diferente daqueles esperados devido aos pulsos originais. A probabilidade de contar  $\gamma_2$  é igual à eficiência total  $\epsilon_{t2}$ . Assim a nova taxa de contagem é dada por:

$$n_1 = Ap_1\epsilon_1 - Ap_1\epsilon_1\epsilon_{t2} = Ap_1\epsilon_1(1-\epsilon_{t2}). \quad (2.13)$$

O fator de correção é dado por:

$$C_1 = \frac{n_{10}}{n_1} = \frac{1}{1-\epsilon_{t2}} \quad (2.14)$$

A situação para o pico 2 é diferente porque uma fração do  $\gamma_2$  é precedido por um decaimento  $\beta$  e por  $\gamma_1$ , assim:

$$n_2 = Ap_2\epsilon_2 - Ap_2\epsilon_2\left(\frac{p_1}{p_2}\right)\epsilon_{t1} = Ap_2\epsilon_2\left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)\epsilon_{t1}\right] \quad (2.15)$$

Desta forma o fator de correção para o pico 2 fica:

$$C_2 = \frac{1}{1 - (p_1/p_2)\epsilon_{t1}} \quad (2.16)$$

o fator  $p_1/p_2$  é a fração de  $\gamma_2$  que é precedida por  $\gamma_1$ .

A correção para pico 3 é de outra forma, pois agora a soma de  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  soma mais um evento no pico 3, assim:

$$n_3 = Ap_3\epsilon_3 + Ap_1\epsilon_1\epsilon_2 \quad (2.17)$$

Desta forma o fator de correção para o pico 3 fica:

$$C_3 = \frac{n_{30}}{n_3} = \frac{1}{1 + p_1 \epsilon_1 \epsilon_2 / (p_3 \epsilon_3)} \quad (2.18)$$

É evidente que o esquema de desintegração do  $^{152}\text{Eu}$  é muito mais complicado que o esquema apresentado no exemplo. Neste caso entram como fatores de correção o coeficiente de conversão interna total, o coeficiente de conversão interna da camada

$K$ , a probabilidade de captura eletrônica, a eficiência total para os diversos picos, com todos esses fatores é claro que as fórmulas de correção tornam-se muito mais extensas que as expressões (2.14), (2.16) e (2.18).

A Tabela 2.1 mostra os fatores de correção devido ao efeito soma.

Energia (keV)	Fator de Correção
244,6989(10)	1,2306
344,2811(19)	1,1297
411,126(3)	1,2904
443,965(4)	1,2205
778,903(6)	1,1625
867,390(6)	1,2341
964,055(4)	1,0738
1085,842(4)	0,9674
1089,767(6)	1,1212
1112,087(6)	1,0181
1212,970(13)	1,2269
1299,152(9)	~1
1408,022(4)	1,0474

Tab. 2.1 - Fatores de correção devido ao efeito soma para os diversos picos do  $^{152}\text{Eu}$ .

Não é de se espantar que se tenham fatores de correção de até 29% para a área dos picos, pois numa geometria próxima pode-se ter uma eficiência total de aproximadamente 0,3 desta forma substituindo na equação (2.14) chega-se a um fator de correção de  $C_I = 1/(1-0,3) = 1,43$ .

A curva de eficiência para a fonte “encostada” no detector, Figura 2.8, os parâmetros da curva e a sua matriz de covariância são mostrados a seguir.

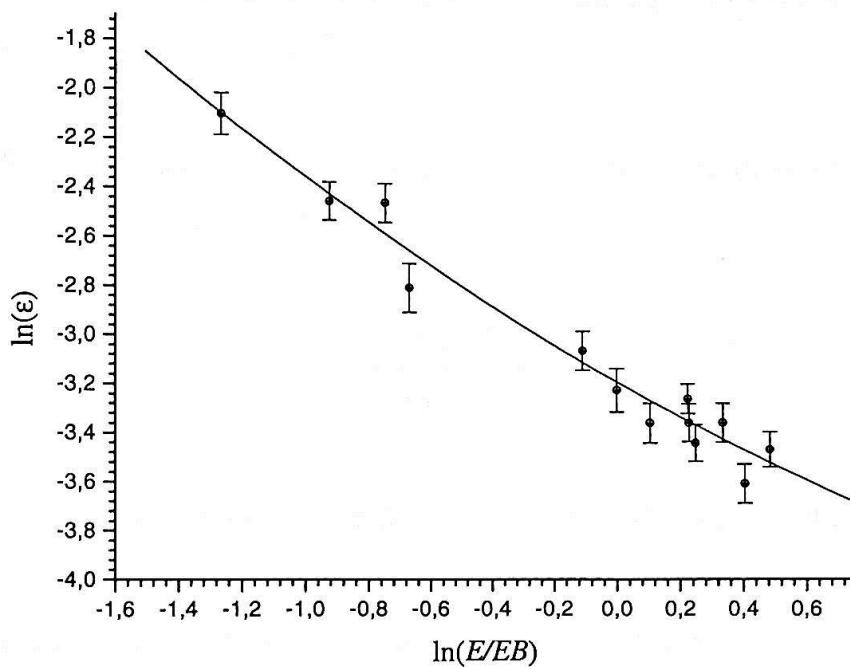


Figura 2.8 - Calibração de eficiência vs. energia fonte “encostada” no detector.

A curva ajustada acima é da forma da equação (2.1a) os parâmetros ajustados são ( $E_B = 866$  keV):  $a_0 = -3,182(36)$ ,  $a_1 = -0,737(78)$  e  $a_2 = 0,100(99)$ .

A matriz de covariância dos parâmetros acima é:

$$\mathbf{V}_{\mathbf{a}'} = \begin{pmatrix} 1,2618 \cdot 10^{-3} & -1,4695 \cdot 10^{-3} & -2,3582 \cdot 10^{-3} \\ -1,4695 \cdot 10^{-3} & 6,0573 \cdot 10^{-3} & 6,5926 \cdot 10^{-3} \\ -2,3582 \cdot 10^{-3} & 6,5926 \cdot 10^{-3} & 9,7595 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}$$

O ajuste produziu um  $\chi^2$  de 14,8 (14 % de probabilidade de ser excedido) para 10 graus de liberdade.

## 2.7 Determinação da Energia Inicial e Corrente Integrada do Feixe de Prótons

Sejam  $A_1$  e  $A_2$  as atividades referentes a dois nuclídeos diferentes ambos formados na mesma amostra irradiada, assim:

$$A_{1(2)} = \frac{n_{1(2)} \cdot \sigma_{1(2)} \cdot i \cdot t_i}{\tau_{1(2)}} \quad (2.19)$$

os índices referem-se às amostras 1 e 2,  $n$  é o número de átomos do elemento formador de 1 e 2,  $\sigma$  são as respectivas seções de choque,  $i$  é a corrente utilizada no ciclotron,  $t_i$  é o tempo de irradiação da amostra e  $\tau$  são as vidas-médias.

Desta forma dividindo-se 1 por 2 chega-se à seguinte expressão:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = R(E) = \frac{A_1 \cdot \tau_1 \cdot n_2}{A_2 \cdot \tau_2 \cdot n_1} \quad (2.20)$$

onde a razão  $R(E)$  entre as seções de choque para a formação de 1 e 2 depende da energia. Para tempos de irradiação da ordem das meias-vidas dos nuclídeos 1 e 2 a equação (2.20) fica:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = R(E) = \frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \frac{A_1}{A_2} \cdot \left[ \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot \frac{\left( 1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_2}} \right)}{\left( 1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_1}} \right)} \right] \quad (2.20a)$$

Calculando-se as atividades devidamente corrigidas para o dia da irradiação e utilizando-se dados de seções de choque é possível, interpolando a razão, chegar-se a

um valor para a energia inicial do feixe. No caso específico da utilização dos dados de seção de choque fornecidos pela referência [Ko85] a expressão (2.20) fica:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = R(E) = \frac{A_1 \tau_1}{A_2 \tau_2} \quad (2.20b)$$

pois os valores de seção de choque desta referência foram normalizados para o cobre natural, desta forma deve-se suprimir número de átomos,  $n$ , do elemento formador de 1 e 2.

Calculando-se a energia inicial é possível calcular a seção de choque (tanto de 1 como de 2) para essa energia. Com a seção de choque calculada a corrente,  $i$ , é dada por (2.19).

Neste experimento foi utilizada uma folha de cobre de espessura  $5 \cdot 10^{-4}$  cm de espessura para a monitoração do feixe. Foram escolhidos os picos de 596 keV do  $^{62}\text{Zn}$ ,  $t_{1/2}=9,26(2)\text{h}$  [Br78], (proveniente da reação  $^{63}\text{Cu}(p, 2n)^{62}\text{Zn}$ ) e de 1115 keV do  $^{65}\text{Zn}$ ,  $244,1(2)\text{d}$  [Br78], (proveniente da reação  $^{65}\text{Cu}(p, n)^{65}\text{Zn}$ ) para calcular a razão entre as atividades. A medida foi feita a uma distância de 20 cm do detector.

A razões calculadas forneceram uma energia inicial de 22,4(3) MeV do feixe de prótons na irradiação do magnésio, o titânio foi irradiado com uma energia de 22,62(17) MeV, as energias nas diversas placas de silício são mostradas na Tabela 2.2 (a degradação da energia do feixe através das placas de silício foi feita utilizando-se o programa TRIM [Zi85]):

Placa	Irradiação 1 (MeV)	Irradiação 2 (MeV)
1	23,69(14)	21,20(15)
2	22,87(14)	18,96(16)
3	22,02(15)	16,50(18)
4	21,15(15)	13,76(20)
5	20,25(16)	10,61(24)
6	19,32(16)	6,8(3)
7	-	0
8	-	0

Tab. 2.2 - Energia, em MeV, do feixe de prótons ao longo das placas de silício na primeira e segunda irradiação.

A energia inicial possibilita o cálculo da corrente utilizada na irradiação. As correntes utilizadas nas irradiações são indicadas na Tabela 2.3.

	Corrente ( $\mu$ A)	Tempo de Irradiação
Mg	1,12(12)	2 h 40 min
Ti	1,38(5)	7 min
Si 1	0,349(9)	4 h 10 min
Si 2	0,221(6)	2 h 20 min

Tab 2.3 - Corrente do feixe de prótons utilizada nas irradiações de Ti, Mg e Si (primeira e segunda irradiação)

Os valores esperados para a energia e corrente integrada deveriam ficar em torno de 24 MeV e 3  $\mu$ Ah. A baixa energia inicial do feixe de prótons impossibilitou a ocorrência da reação  $^{29}\text{Si}(\text{p}, 2\alpha)^{22}\text{Na}$  ( $Q = -14273,7(5)$  keV) a partir da terceira placa na segunda irradiação. A baixa corrente de prótons também ocasionou uma formação de  $^{22}\text{Na}$  bem abaixo daquela esperada em cálculos preliminares. Outro problema grave ocorrido na irradiação das placas de silício foi o acidente ocorrido no manuseio das amostras. O silício por ser um material muito frágil, principalmente levando-se em conta a espessura das placas utilizadas (0,2 mm), fragmentou-se na primeira irradiação devido a pressões mecânicas do porta amostras utilizado no ciclotron (esse fator se fará notar na determinação das diversas seções de choque na primeira irradiação), a ocorrência deste acidente foi um dos motivos para construção de um recipiente (fig. 2.2) que acondicionasse as amostras evitando, assim, que as mesmas fossem pressionadas e quebrassem.

## 2.8 Análise das Placas de Silício

Devido à baixa atividade das placas de silício (da ordem de kBq) a amostra foi medida “encostada” no detector. A primeira placa foi medida tomando-se 46 espectros de 1 hora cada, nas demais foram tomados 48 de 1 hora. A idéia inicial era tomar 48 espectros de todas as placas, porém problemas causados pela eletrônica e pelo detector impossibilitaram a gravação dos dois últimos espectros da primeira placa.

A seguir serão mostradas as tabelas de análise dos espectros das seis placas medidas na primeira irradiação. São mostrados, também os gráficos dos ajustes referentes aos picos de 1274 keV do  $^{22}\text{Na}$ .

Em todas as tabelas de análise de espectro (silício, magnésio e titânio) as intensidades das transições gama foram retiradas de [Br86].

Irradiação 1 - Placa 1			
Energia (keV)	I(%)	Área ( $\times 10^3$ )	Origem
122,099(21)	85,5(4)	2,45(11)	$^{57}\text{Co}$
127,265(51)	12,9(8)	0,876(83)	$^{57}\text{Ni}$
136,38(13)	10,69(17)	0,348(80)	$^{57}\text{Co}$
159,370(13)	68(2)	4,80(13)	$^{47}\text{Sc}$
174,97(13)	7,47(7)	0,414(11)	$^{48}\text{Sc}$
184,557(11)	20,4(4)	6,31(14)	$^{67}\text{Ga}$
208,79(12)	2,33(6)	0,34(10)	$^{67}\text{Ga}$
271,23(5)	86,6	1,42(13)	$^{44}\text{Sc}$
300,192(21)	16,6(3)	2,93(12)	$^{67}\text{Ga}$
320,037(18)	9,83	3,81(13)	$^{51}\text{Cr}$
388,470(37)	84,8	1,470(97)	$^{87}\text{Y}$
393,529(75)	4,64(9)	0,657(78)	$^{67}\text{Ga}$
477,3340(90)	-	9,38(13)	-
484,789(45)	92,2	1,202(70)	$^{87}\text{Y}$
510,9130(40)	-	94,86(40)	$e^+e^-$
744,1000(70)	90,0(19)	15,03(15)	$^{52}\text{Mn}$
803,227(66)	-	2,55(62)	-
834,737(39)	99,975(2)	1,24(12)	$^{54}\text{Mn}$
846,7160(90)	99,9	12,89(19)	$^{56}\text{Co}$
909,027(17)	0,0095	4,56(15)	$^{89}\text{Zr}$
935,4080(90)	94,5(20)	13,03(22)	$^{52}\text{Mn}$
983,428(36)	100	1,74(12)	$^{48}\text{Sc}$
1037,747(49)	14,1(3)	1,27(14)	$^{56}\text{Co} + ^{48}\text{Sc}$
1115,13(16)	50,75(10)	0,28(11)	$^{65}\text{Zn}$
1238,152(19)	67,0(13)	5,30(18)	$^{56}\text{Co}$
1246,18(11)	4,21(10)	0,338(92)	$^{52}\text{Mn}$
1274,436(17)	99,937(15)	5,77(18)	$^{22}\text{Na}$
1311,947(50)	100	1,22(15)	$^{48}\text{Sc}$
1333,41(12)	5,09(11)	0,37(10)	$^{52}\text{Mn}$
1377,238(85)	77,9(16)	0,949(89)	$^{57}\text{Ni}$
1433,904(13)	98,2(20)	9,15(23)	$^{52}\text{Mn}$
1771,117(65)	15,5(3)	1,19(20)	$^{56}\text{Co}$
1785,100(81)	-	0,96(29)	Soma $^{22}\text{Na}$
1919,04(15)	14,7(9)	0,451(39)	$^{57}\text{Ni}$
2014,90(27)	3,03(6)	0,153(26)	$^{56}\text{Co}$
2034,49(10)	7,77(16)	0,480(35)	$^{56}\text{Co}$
2598,339(62)	16,7(3)	0,944(53)	$^{56}\text{Co}$

Tab 2.4 - Análise do espectro referente à primeira placa de Si na primeira irradiação. Em destaque o pico referente ao  $^{22}\text{Na}$ .

Irradiação 1 - Placa 2			
Energia (keV)	I(%)	Área(x10 <sup>3</sup> )	Origem
122,0820(90)	85,5(4)	5,81(13)	<sup>57</sup> Co
127,209(31)	12,9(8)	1,247(74)	<sup>57</sup> Ni
136,559(50)	10,69(17)	0,798(93)	<sup>57</sup> Co
159,392(15)	68(2)	3,46(11)	<sup>47</sup> Sc
184,5840(60)	20,4(4)	13,36(15)	<sup>67</sup> Ga
208,935(38)	2,33(6)	1,044(90)	<sup>67</sup> Ga
271,33(10)	86,6	0,437(91)	<sup>44</sup> Sc
300,1930(90)	16,6(3)	6,65(15)	<sup>67</sup> Ga
320,071(10)	9,83	5,94(11)	<sup>51</sup> Cr
388,476(30)	84,8	1,579(80)	<sup>87</sup> Y
393,482(27)	4,64(9)	1,761(82)	<sup>67</sup> Ga
477,486(23)	-	2,099(75)	-
484,727(31)	92,2	1,387(66)	<sup>87</sup> Y
510,865(11)	-	20,24(23)	e <sup>+</sup> /e <sup>-</sup>
744,089(18)	90,0(19)	3,034(84)	<sup>52</sup> Mn
802,904(80)	-	0,671(81)	-
834,71(10)	99,975(2)	0,447(73)	<sup>54</sup> Mn
846,683(13)	99,9	6,37(11)	<sup>56</sup> Co
909,40(13)	0,0095	0,59(12)	<sup>89</sup> Sr
935,404(23)	94,5(20)	2,988(94)	<sup>52</sup> Mn
983,420(47)	100	0,880(64)	<sup>48</sup> Sc
1037,736(74)	14,1(3)	0,608(67)	<sup>56</sup> Co + <sup>48</sup> Sc
1115,277(67)	50,75(10)	0,588(63)	<sup>65</sup> Zn
1238,123(26)	67,0(13)	2,570(83)	<sup>56</sup> Co
1274,435(35)	99,937(15)	1,409(65)	<sup>22</sup> Na
1312,016(63)	100	0,599(56)	<sup>48</sup> Sc
1332,10(21)	5,09(11)	0,218(62)	<sup>52</sup> Mn
1359,09(40)	4,29(9)	0,18(12)	<sup>56</sup> Co
1377,383(53)	77,9(16)	0,961(65)	<sup>57</sup> Ni
1434,069(63)	98,2(20)	1,82(12)	<sup>52</sup> Mn
1771,08(11)	15,5(3)	0,511(51)	<sup>56</sup> Co
1785,16(16)	-	0,329(34)	Soma <sup>22</sup> Na
1919,45(20)	14,7(9)	0,188(57)	<sup>57</sup> Ni
2015,00(26)	3,03(6)	0,120(24)	<sup>56</sup> Co
2034,17(17)	7,77(16)	0,197(27)	<sup>56</sup> Co
2598,36(10)	16,7(3)	0,389(47)	<sup>56</sup> Co

Tab 2.5 - Análise do espectro referente à segunda placa de Si na primeira irradiação. Em destaque o pico referente ao <sup>22</sup>Na.

Irradiação 1 - Placa 3			
Energia (keV)	I(%)	Área( $\times 10^3$ )	Origem
122,109(84)	85,5(4)	0,327(74)	$^{57}\text{Co}$
159,40(10)	68(2)	0,252(71)	$^{47}\text{Sc}$
184,899(78)	20,4(4)	0,73(11)	$^{67}\text{Ga}$
320,127(21)	9,83	1,886(82)	$^{51}\text{Cr}$
388,77(17)	84,8	0,316(90)	$^{87}\text{Y}$
477,67(6)	-	0,565(64)	-
510,700(42)	-	3,03(15)	$e^+/e^-$
744,095(54)	90,0(19)	0,792(64)	$^{52}\text{Mn}$
935,557(75)	94,5(20)	0,660(69)	$^{52}\text{Mn}$
983,44(26)	100	0,152(61)	$^{48}\text{Sc}$
1238,221(82)	67,0(13)	0,594(63)	$^{56}\text{Co}$
1274,68(26)	99,937(15)	0,093(40)	$^{22}\text{Na}$
1312,14(22)	100	0,165(55)	$^{48}\text{Sc}$
1434,17(10)	98,2(20)	0,506(66)	$^{52}\text{Mn}$
1771,14(20)	15,5(3)	0,261(88)	$^{56}\text{Co}$
2599,12(25)	16,7(3)	0,089(31)	$^{56}\text{Co}$

Tab 2.6 - Análise do espectro referente à terceira placa de Si na primeira irradiação. Em destaque o pico referente ao  $^{22}\text{Na}$ .

Irradiação 1 - Placa 4			
Energia (keV)	I(%)	Área( $\times 10^3$ )	Origem
122,100(12)	85,5(4)	3,81(10)	$^{57}\text{Co}$
136,494(74)	10,69(17)	0,67(10)	$^{57}\text{Co}$
159,47(5)	68(2)	0,928(97)	$^{47}\text{Sc}$
184,672(22)	20,4(4)	2,74(12)	$^{67}\text{Ga}$
208,68(12)	2,33(6)	0,270(80)	$^{67}\text{Ga}$
300,207(38)	16,6(3)	1,19(12)	$^{67}\text{Ga}$
320,104(16)	9,83	3,136(97)	$^{51}\text{Cr}$
388,62(12)	84,8	0,350(74)	$^{87}\text{Y}$
393,54(12)	4,64(9)	0,369(75)	$^{87}\text{Y}$
477,576(36)	-	0,996(69)	-
510,870(19)	-	9,43(20)	$e^+/e^-$
744,078(45)	90,0(19)	0,975(68)	$^{52}\text{Mn}$
834,82(11)	99,975(2)	0,366(65)	$^{54}\text{Mn}$
846,772(14)	99,9	5,72(27)	$^{56}\text{Co}$
935,428(62)	94,5(20)	0,768(69)	$^{52}\text{Mn}$
983,567(55)	100	0,810(65)	$^{48}\text{Sc}$
1037,781(68)	14,1(3)	0,451(51)	$^{56}\text{Co} + ^{48}\text{Sc}$
1115,435(82)	50,75(10)	0,387(67)	$^{65}\text{Zn}$
1238,215(28)	67,0(13)	2,480(79)	$^{56}\text{Co}$
1274,516(60)	99,937(15)	0,817(66)	$^{22}\text{Na}$
1311,992(64)	100	0,730(64)	$^{48}\text{Sc}$
1359,25(29)	4,29(9)	0,132(56)	$^{56}\text{Co}$
1433,978(81)	98,2(20)	0,507(55)	$^{52}\text{Mn}$
1771,129(91)	15,5(3)	0,495(52)	$^{56}\text{Co}$
1785,16(17)	-	0,243(59)	Soma $^{22}\text{Na}$
2034,39(17)	7,77(16)	0,261(29)	$^{56}\text{Co}$
2598,61(11)	16,7(3)	0,459(53)	$^{56}\text{Co}$

Tab 2.7 - Análise do espectro referente à quarta placa de Si na primeira irradiação. Em destaque o pico referente ao  $^{22}\text{Na}$ .

Irradiação 1 - Placa 5			
Energia (keV)	I(%)	Área( $\times 10^3$ )	Incerteza
122,136(63)	85,5(4)	0,497(78)	$^{57}\text{Co}$
320,150(32)	9,83	1,092(74)	$^{51}\text{Cr}$
477,85(13)	-	0,291(69)	-
510,6679(61)	-	2,17(14)	$e^+/e^-$
744,34(11)	90,0(19)	0,224(50)	$^{52}\text{Mn}$
846,921(27)	99,9	2,268(84)	$^{56}\text{Co}$
935,65(11)	94,5(20)	0,291(51)	$^{52}\text{Mn}$
1037,88(12)	14,1(3)	0,157(38)	$^{56}\text{Co} + ^{48}\text{Sc}$
1238,580(58)	67,0(13)	0,949(68)	$^{56}\text{Co}$
1312,56(31)	100	0,077(43)	$^{48}\text{Sc}$
1434,11(19)	98,2(20)	0,277(82)	$^{52}\text{Mn}$
1771,64(24)	15,5(3)	0,24(15)	$^{56}\text{Co}$
2599,23(21)	16,7(3)	0,34(25)	$^{56}\text{Co}$

Tab 2.8 - Análise do espectro referente à quinta placa de Si na primeira irradiação.

Irradiação 1 - Placa 6			
Energia (keV)	I(%)	Área( $\times 10^3$ )	Incerteza
122,1280(80)	85,5(4)	7,44(12)	$^{57}\text{Co}$
136,614(40)	10,69(17)	1,119(93)	$^{57}\text{Co}$
184,608(37)	20,4(4)	1,39(10)	$^{67}\text{Ga}$
320,111(11)	9,83	4,86(10)	$^{51}\text{Cr}$
477,646(95)	-	0,389(67)	-
510,870(26)	-	6,03(17)	$e^+/e^-$
744,208(29)	90,0(19)	1,602(69)	$^{52}\text{Mn}$
834,839(85)	99,975(2)	0,423(59)	$^{54}\text{Mn}$
846,818(11)	99,9	7,49(11)	$^{56}\text{Co}$
935,515(36)	94,5(20)	1,436(71)	$^{52}\text{Mn}$
1037,842(59)	14,1(3)	0,655(57)	$^{56}\text{Co} + ^{48}\text{Sc}$
1115,587(45)	50,75(10)	1,031(90)	$^{65}\text{Zn}$
1238,296(24)	67,0(13)	3,094(83)	$^{56}\text{Co}$
1274,50(16)	99,937(15)	0,191(46)	$^{22}\text{Na}$
1312,16(20)	100	0,200(63)	$^{48}\text{Sc}$
1360,02(30)	4,29(9)	0,190(70)	$^{56}\text{Co}$
1434,107(43)	98,2(20)	1,153(62)	$^{52}\text{Mn}$
1771,417(81)	15,5(3)	0,538(44)	$^{56}\text{Co}$
1785,16(23)	-	0,069(26)	Soma $^{22}\text{Na}$
2014,58(12)	3,03(6)	0,063(16)	$^{56}\text{Co}$
2034,77(14)	7,77(16)	0,141(28)	$^{56}\text{Co}$
2598,595(91)	16,7(3)	0,595(67)	$^{56}\text{Co}$

Tab 2.9 - Análise do espectro referente à sexta placa de Si. Em destaque o pico referente ao  $^{22}\text{Na}$ .

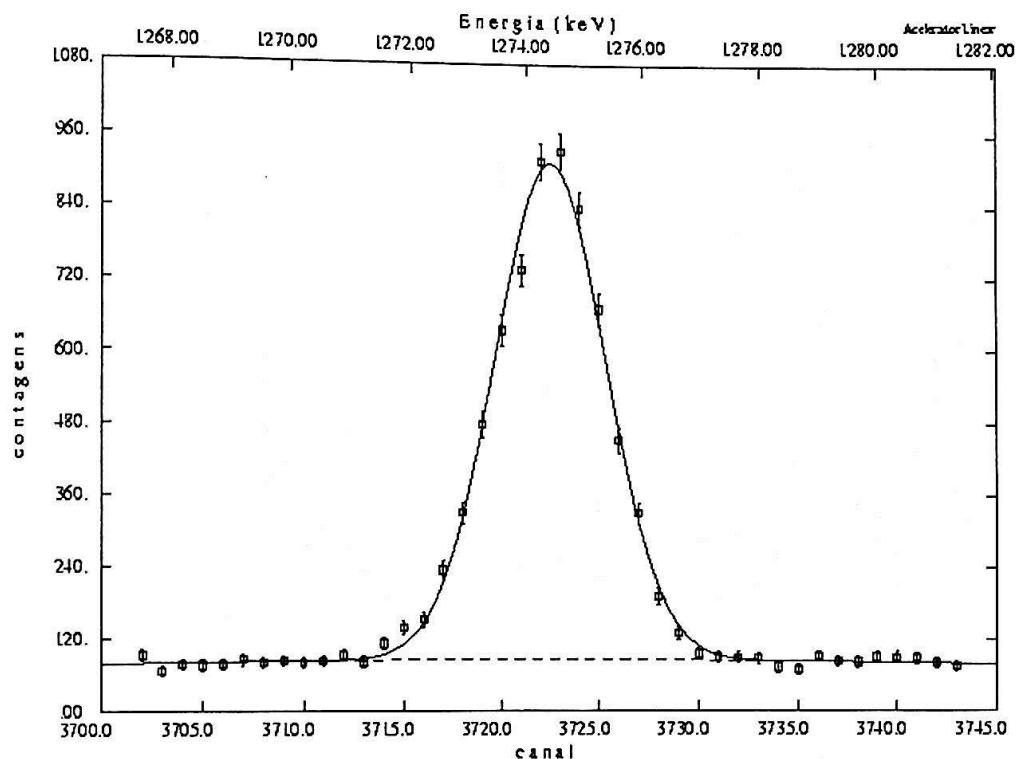


Fig. 2.9 - Ajuste do pico de 1274 keV do  $^{22}\text{Na}$  referente à primeira placa de Si na primeira irradiação.

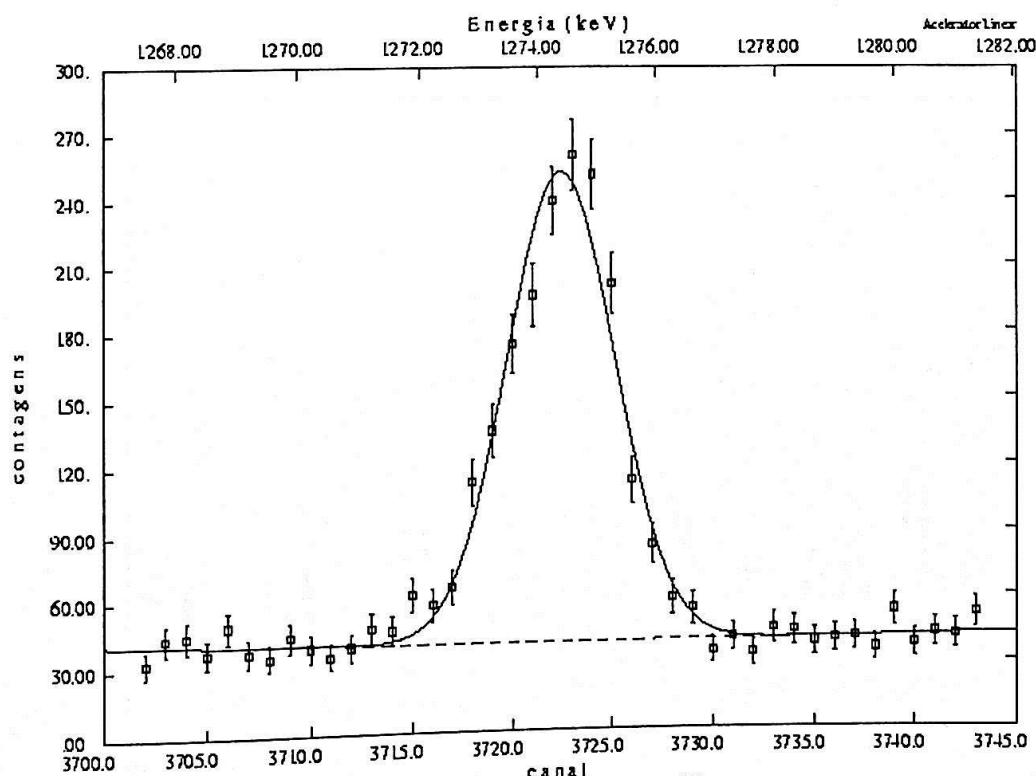


Fig. 2.10 - Ajuste do pico de 1274 keV do  $^{22}\text{Na}$  referente à segunda placa de Si na primeira irradiação.

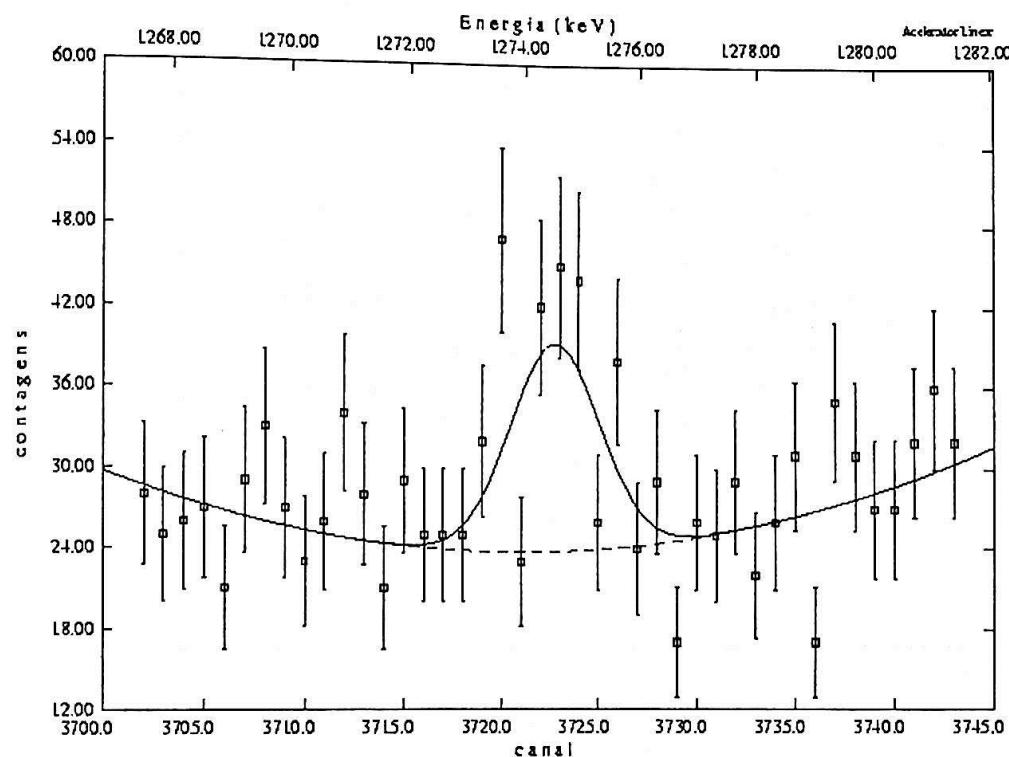


Fig. 2.11 - Ajuste do pico de 1274 keV do  $^{22}\text{Na}$  referente à terceira placa de Si na primeira irradiação.

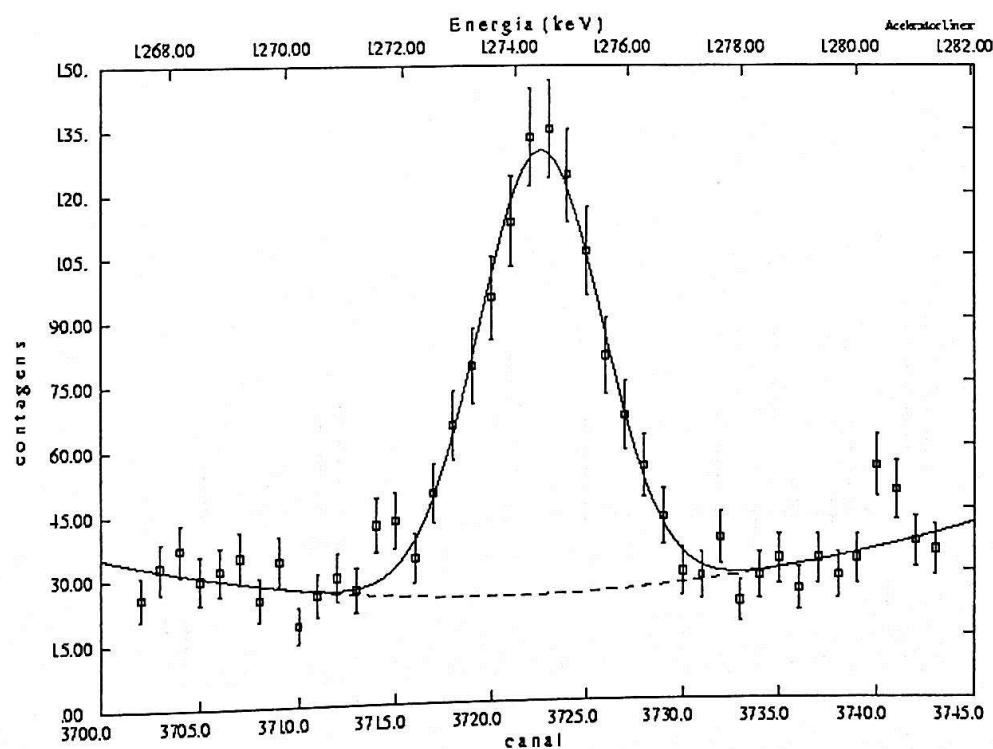


Fig. 2.12 - Ajuste do pico de 1274 keV do  $^{22}\text{Na}$  referente à quarta placa de Si na primeira irradiação.

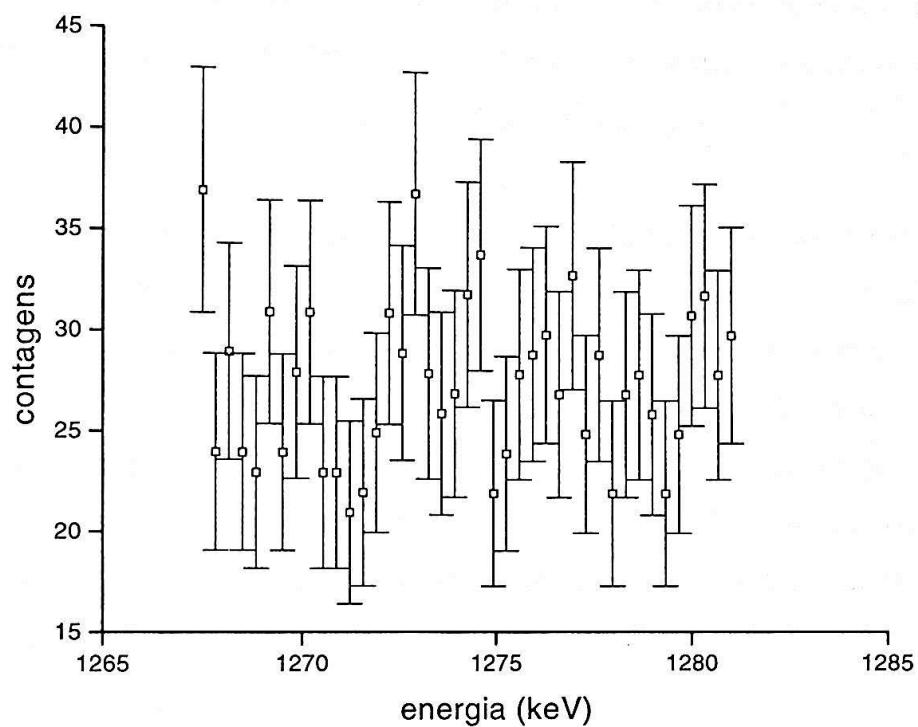


Fig. 2.13 - Região de 1274 keV referente à quinta placa de Si na primeira irradiação evidenciando a ausência de pico.

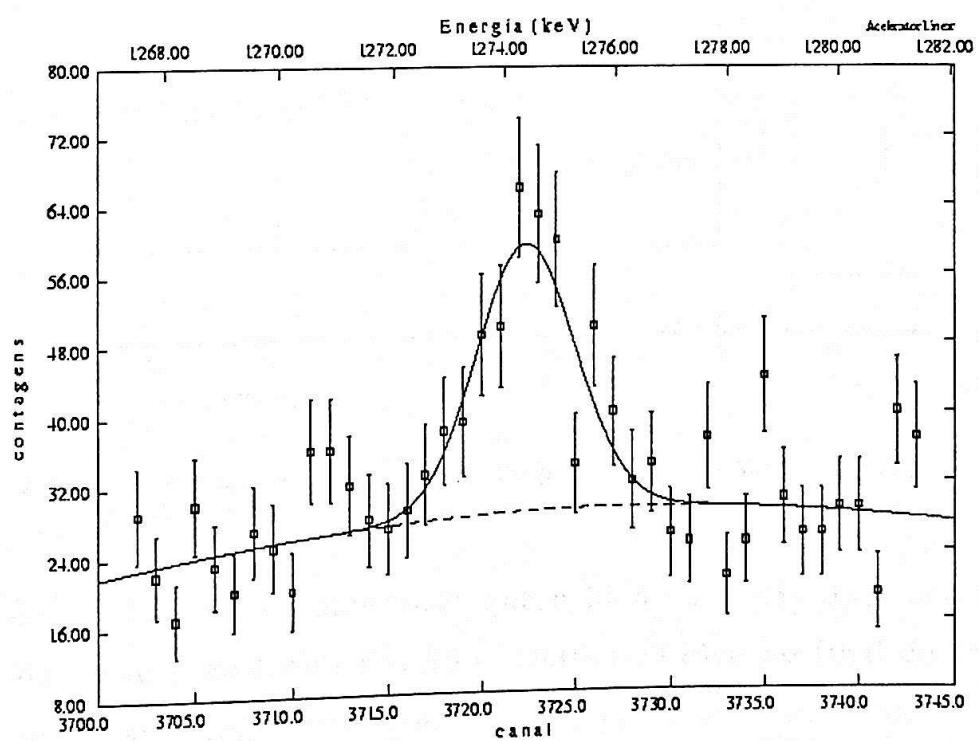


Fig. 2.14 - Ajuste do pico de 1274 keV do  $^{22}\text{Na}$  referente à sexta placa de Si.

Devido à grande quantidade de átomos de silício presentes em todas as placas juntas (volume de, aproximadamente,  $0,3 \text{ cm}^3$ ) foi feita uma tentativa de detecção do  $^{26}\text{Al}$ , de meia-vida extremamente elevada ( $7,2 \times 10^5$  anos).

A grande quantidade de espectros somados (foram somados 96 espectros de 1 hora cada) exigiu um cuidado especial na verificação de possível “passeio” do espectro. Tomou-se como referência dois picos do espectro de 1 hora, um localizado no começo do espectro (122 keV) e outro localizado no final (1771 keV). O primeiro é proveniente do  $^{57}\text{Co}$  e o segundo do  $^{56}\text{Co}$ . A Figura 2.15 mostra os gráficos referentes à posição dos centróides do primeiro e segundo pico. As linhas paralelas acima e abaixo dos pontos experimentais correspondem à média (linha tracejada) dos pontos experimentais acrescida e subtraída de 1 keV, respectivamente.

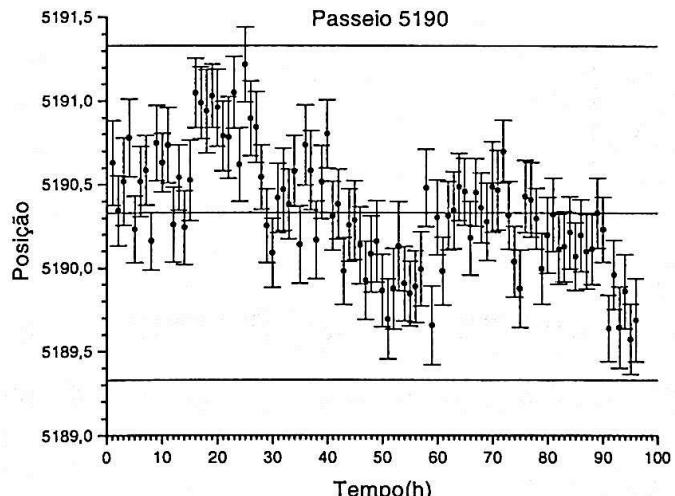
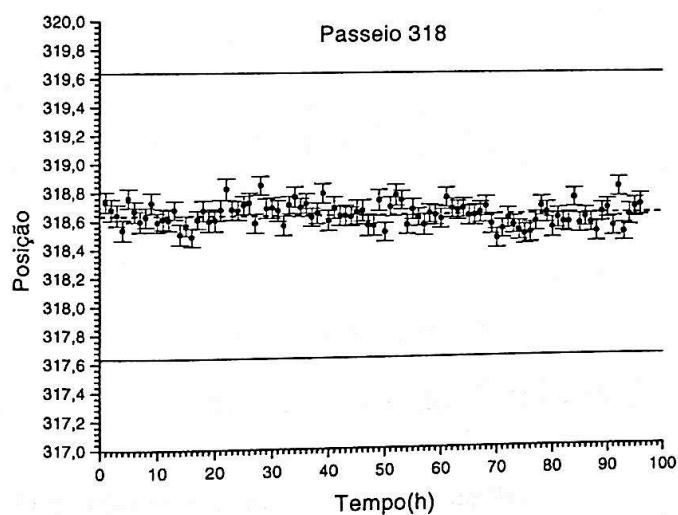


Fig. 2.15 - Esquerda: passeio referente ao pico de 122 keV (canal 318)  
Direita: passeio referente ao pico de 1771 keV (canal 5190)

Nota-se pelos gráfico anteriores que o pico no início do espectro praticamente não muda de posição ao longo dos 96 espectros. O pico no final do espectro, embora apresente uma estrutura, varia dentro da faixa de  $\pm 1$  keV. Desta forma não foi necessária nenhuma relocação dos espectros.

A seguir é mostrado o espectro de 96 horas na região referente ao pico de energia de 1809 keV do  $^{26}\text{Al}$ . Nota-se pelo gráfico que o pico de 1809 keV do  $^{26}\text{Al}$  não aparece (no artigo [Sa72] é feita a detecção do  $^{26}\text{Al}$  por espectroscopia gama). O primeiro pico ( $110(10) \times 10$  contagens) corresponde à energia de 1810 keV ( $I = 0,650(20)\%$ ) do  $^{56}\text{Co}$ . Isso pode ser comprovado pela linha, também do  $^{56}\text{Co}$ , de 1238 keV ( $I = 67,0(13)\%$ ) que aparece com uma área, aproximadamente, 100 vezes maior ( $1502(5) \times 100$  contagens). O segundo pico da esquerda para a direita corresponde à soma das energias de 846+977 keV do  $^{56}\text{Co}$  (devido à geometria utilizada, a presença de picos soma ocorre em diversas cascatas [Fi96][Br86]) que aparece com  $1100(9)$  contagens.

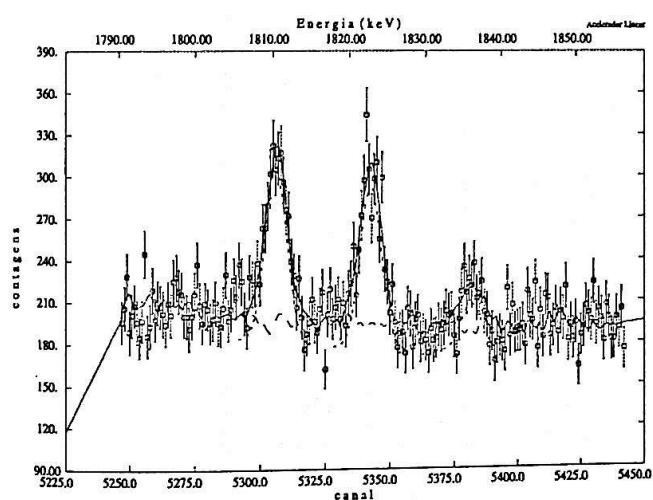


Fig. 2.16 - Ajuste do pico de 1810 keV (primeiro pico à esquerda) do  $^{56}\text{Co}$ . Espectro de 96 h referente a todas as placas de Si.

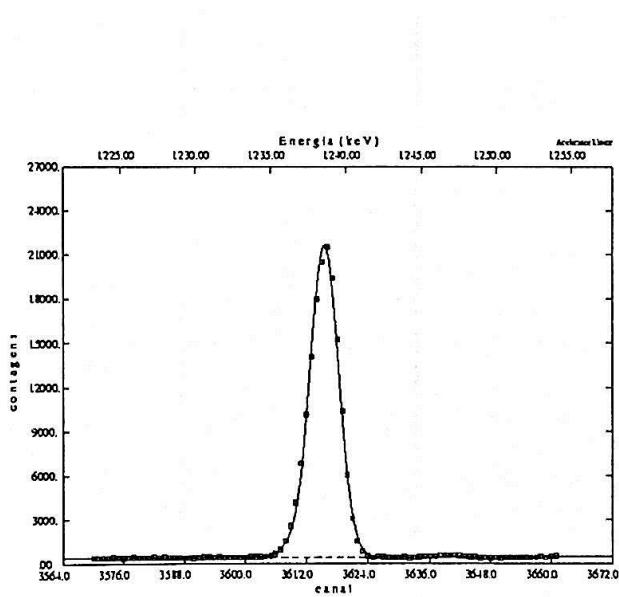


Fig. 2.17 - Ajuste do pico de 1238 keV do  $^{56}\text{Co}$ . Espectro de 96 h referente a todas as placas de Si.

As tabelas de análise dos espectros provenientes da segunda irradiação bem como os gráficos dos ajustes referentes aos picos de 1274 keV do  $^{22}\text{Na}$  serão apresentados a seguir.

Irradiação 2 - Placa 1			
Energia (keV)	I(%)	Área ( $\times 10^3$ )	Origem
122,240(11)	85,5(4)	2,49(10)	$^{57}\text{Co}$
136,64(8)	10,69(17)	0,16(6)	$^{57}\text{Co}$
159,569(6)	68(2)	7,18(18)	$^{47}\text{Sc}$
184,755(6)	20,4(4)	7,90(19)	$^{67}\text{Ga}$
209,09(4)	2,33(6)	0,71(13)	$^{67}\text{Ga}$
271,46(4)	86,6	0,55(12)	$^{44}\text{Sc}$
300,347(10)	16,6(3)	4,87(20)	$^{67}\text{Ga}$
320,173(13)	9,83	2,81(15)	$^{51}\text{Cr}$
388,599(15)	84,8	2,36(7)	$^{87}\text{Y}$
393,590(22)	4,64(9)	1,30(6)	$^{67}\text{Ga}$
477,675(20)	-	1,74(6)	-
484,891(18)	92,2	2,04(7)	$^{87}\text{Y}$
511,096(7)	-	37,6(6)	$e^+/\bar{e}^-$
744,569(20)	90,0(19)	1,96(7)	$^{52}\text{Mn}$
803,58(6)	-	0,44(5)	-
811,22(10)	99,5(3)	0,28(5)	$^{58}\text{Co}$
835,28(8)	99,975(2)	0,19(4)	$^{54}\text{Mn}$
847,225(16)	99,9	3,04(8)	$^{56}\text{Co}$
909,51(5)	99,01	0,74(5)	$^{89}\text{Zr}$
935,970(25)	94,5(20)	1,73(7)	$^{52}\text{Mn}$
983,90(4)	100	0,70(5)	$^{48}\text{Sc}$
1038,33(8)	14,1(3)	0,40(5)	$^{56}\text{Co}$
1115,895(5)	50,75(10)	23,44(16)	$^{65}\text{Zn}$
1238,533(28)	67,0(13)	1,41(5)	$^{56}\text{Co}$
1274,781(15)	99,937(15)	3,45(7)	$^{22}\text{Na}$
1297,10(10)	74,9	0,23(4)	$^{47}\text{Ca}$
1312,28(5)	100	0,54(4)	$^{48}\text{Sc}$
1360,52(29)	4,29(9)	0,17(9)	$^{56}\text{Co}$
1377,77(8)	77,9(16)	0,28(3)	$^{57}\text{Ni}$
1434,12(3)	98,2(20)	1,19(5)	$^{52}\text{Mn}$
1770,60(10)	15,5(3)	0,224(22)	$^{56}\text{Co}$
1784,50(6)	-	0,509(29)	Soma $^{22}\text{Na}$
2598,63(10)	16,7(3)	0,202(17)	$^{56}\text{Co}$

Tab 2.10 - Análise do espectro referente à primeira placa de Si da segunda irradiação. Em destaque o pico referente ao  $^{22}\text{Na}$ .

Irradiação 2 - Placa 2			
Energia (keV)	I(%)	Área ( $\times 10^3$ )	Origem
122,042(6)	85,5(4)	9,06(12)	$^{57}\text{Co}$
136,44(3)	10,69(17)	0,95(9)	$^{57}\text{Co}$
159,365(16)	68(2)	2,18(8)	$^{47}\text{Sc}$
185,593(28)	20,4(4)	1,26(8)	$^{67}\text{Ga}$
208,62(21)	2,33(6)	0,18(7)	$^{67}\text{Ga}$
319,908(8)	9,83	6,25(10)	$^{51}\text{Cr}$
388,33(5)	84,8	0,49(6)	$^{87}\text{Y}$
477,388(29)	-	1,19(6)	-
484,54(6)	92,2	0,55(5)	$^{87}\text{Y}$
510,850(8)	-	26,41(21)	$e^+e^-$
744,244(14)	90,0(19)	3,58(8)	$^{52}\text{Mn}$
803,04(13)	-	0,26(6)	-
810,74(7)	99,5(3)	0,46(5)	$^{58}\text{Co}$
834,91(9)	99,975(2)	0,42(6)	$^{54}\text{Mn}$
846,855(6)	99,9	14,81(20)	$^{56}\text{Co}$
909,17(5)	99,01	0,69(5)	$^{89}\text{Zr}$
935,595(16)	94,5(20)	3,06(7)	$^{52}\text{Mn}$
983,583(13)	100	4,34(8)	$^{48}\text{Sc}$
1037,843(27)	14,1(3)	1,53(6)	$^{56}\text{Co}$
1238,105(11)	67,0(13)	6,45(9)	$^{56}\text{Co}$
1274,30(7)	99,937(15)	0,55(5)	$^{22}\text{Na}$
1311,789(17)	100	3,32(7)	$^{48}\text{Sc}$
1359,66(7)	4,29(9)	0,51(4)	$^{56}\text{Co}$
1433,545(23)	98,2(20)	2,20(6)	$^{52}\text{Mn}$
1770,041(33)	15,5(3)	1,26(4)	$^{56}\text{Co}$
2598,17(4)	16,7(3)	1,05(4)	$^{56}\text{Co}$

Tab 2.11 - Análise do espectro referente à segunda placa de Si da segunda irradiação. Em destaque o pico referente ao  $^{22}\text{Na}$ .

Irradiação 2 - Placa 3			
Energia (keV)	I(%)	Área ( $\times 10^3$ )	Origem
122,086(10)	85,5(4)	3,98(9)	$^{57}\text{Co}$
136,48(6)	10,69(17)	0,55(7)	$^{57}\text{Co}$
159,41(4)	68(2)	0,66(7)	$^{47}\text{Sc}$
185,71(4)	20,4(4)	1,05(7)	$^{67}\text{Ga}$
319,962(18)	9,83	1,95(7)	$^{51}\text{Cr}$
477,46(4)	-	0,78(6)	-
510,878(8)	-	510,878(8)	$e^+/e^-$
744,26(3)	90,0(19)	1,09(6)	$^{52}\text{Mn}$
810,78(9)	99,5(3)	0,31(5)	$^{58}\text{Co}$
846,832(5)	99,9	23,18(16)	$^{56}\text{Co}$
935,60(4)	94,5(20)	1,01(5)	$^{52}\text{Mn}$
983,545(17)	100	2,90(7)	$^{48}\text{Sc}$
1037,856(19)	14,1(3)	2,32(7)	$^{56}\text{Co}$
1238,069(9)	67,0(13)	9,84(11)	$^{56}\text{Co}$
1274,05(21)	99,937(15)	0,12(4)	$^{22}\text{Na}$
1311,807(21)	100	2,03(6)	$^{48}\text{Sc}$
1360,66(6)	4,29(9)	0,77(5)	$^{56}\text{Co}$
1377,60(16)	77,9(16)	0,102(29)	$^{57}\text{Ni}$
1433,50(4)	98,2(20)	0,63(4)	$^{52}\text{Mn}$
1769,886(27)	15,5(3)	1,86(5)	$^{56}\text{Co}$
2598,03(3)	16,7(3)	1,84(4)	$^{56}\text{Co}$

Tab 2.13 - Análise do espectro referente à terceira placa de Si da segunda irradiação. Em destaque o pico referente ao  $^{22}\text{Na}$ .

Irradiação 2 - Placa 4			
Energia (keV)	I(%)	Área ( $\times 10^3$ )	Origem
122,07(4)	85,5(4)	0,86(8)	$^{57}\text{Co}$
136,96(21)	10,69(17)	0,26(9)	$^{57}\text{Co}$
159,34(14)	68(2)	0,20(7)	$^{47}\text{Sc}$
185,695(27)	20,4(4)	1,00(6)	$^{67}\text{Ga}$
320,06(17)	9,83	0,15(6)	$^{51}\text{Cr}$
477,42(10)	-	0,20(4)	-
510,884(10)	-	15,49(17)	$e^+/e^-$
744,19(7)	90,0(19)	0,48(5)	$^{52}\text{Mn}$
803,14(12)	-	0,18(3)	-
810,74(15)	99,5(3)	0,15(3)	$^{58}\text{Co}$
835,10(23)	99,975(2)	0,103(28)	$^{54}\text{Mn}$
846,864(7)	99,9	12,80(12)	$^{56}\text{Co}$
935,45(6)	94,5(20)	0,39(4)	$^{52}\text{Mn}$
983,580(22)	100	1,69(5)	$^{48}\text{Sc}$
1037,851(26)	14,1(3)	1,39(54)	$^{56}\text{Co}$
1115,66(14)	50,75(10)	0,102(24)	$^{65}\text{Zn}$
1238,110(12)	67,0(13)	5,59(8)	$^{56}\text{Co}$
1311,83(3)	100	1,28(8)	$^{48}\text{Sc}$
1359,90(12)	4,29(9)	0,36(5)	$^{56}\text{Co}$
1433,42(12)	98,2(20)	0,21(5)	$^{52}\text{Mn}$
1769,91(4)	15,5(3)	0,98(4)	$^{56}\text{Co}$
2598,10(5)	16,7(3)	0,82(5)	$^{56}\text{Co}$

Tab 2.14 - Análise do espectro referente à quarta placa de Si da segunda irradiação.

Irradiação 2 - Placa 5			
Energia (keV)	I(%)	Área ( $\times 10^3$ )	Origem
122,081(24)	85,5(4)	1,45(8)	$^{57}\text{Co}$
136,62(11)	10,69(17)	0,20(5)	$^{57}\text{Co}$
185,743(26)	20,4(4)	1,00(6)	$^{67}\text{Ga}$
477,25(14)	-	0,25(6)	-
510,869(9)	-	19,85(23)	$e^+e^-$
802,87(18)	-	0,24(5)	-
810,94(17)	99,5(3)	0,26(5)	$^{58}\text{Co}$
846,827(5)	99,9	23,00(18)	$^{56}\text{Co}$
934,64920)	94,5(20)	0,13(5)	$^{52}\text{Mn}$
983,540(24)	100	1,64(6)	$^{48}\text{Sc}$
1037,814(20)	14,1(3)	2,34(7)	$^{56}\text{Co}$
1115,40(4)	50,75(10)	1,02(6)	$^{65}\text{Zn}$
1238,064(9)	67,0(13)	9,76(13)	$^{56}\text{Co}$
1311,79(3)	100	1,17(5)	$^{48}\text{Sc}$
1359,68(6)	4,29(9)	0,79(5)	$^{56}\text{Co}$
1377,08(16)	77,9(16)	0,12(3)	$^{57}\text{Ni}$
1769,891(27)	15,5(3)	1,90(5)	$^{56}\text{Co}$
2598,01(3)	16,7(3)	1,79(5)	$^{56}\text{Co}$

Tab 2.15 - Análise do espectro referente à quinta placa de Si da segunda irradiação.

Irradiação 2 - Placa 6			
Energia (keV)	I(%)	Área ( $\times 10^3$ )	Origem
122,06(4)	85,5(4)	0,66(6)	$^{57}\text{Co}$
136,12(23)	10,69(17)	0,15(6)	$^{57}\text{Co}$
185,686(27)	20,4(4)	1,07(6)	$^{67}\text{Ga}$
477,56(12)	-	0,24(5)	-
510,820(15)	-	8,75(14)	$e^+e^-$
803,02(12)	-	0,21(4)	-
846,754(11)	99,9	4,83(8)	$^{56}\text{Co}$
934,56(23)	94,5(20)	0,15(5)	$^{52}\text{Mn}$
983,44(3)	100	0,94(4)	$^{48}\text{Sc}$
1037,72(5)	14,1(3)	0,45(4)	$^{56}\text{Co}$
1115,43(16)	50,75(10)	0,11(3)	$^{65}\text{Zn}$
1237,953(21)	67,0(13)	2,03(6)	$^{56}\text{Co}$
1311,61(4)	100	0,64(4)	$^{48}\text{Sc}$
1359,86(15)	4,29(9)	0,12(22)	$^{56}\text{Co}$
2598,80(8)	16,7(3)	0,36(28)	$^{56}\text{Co}$

Tab 2.16 - Análise do espectro referente à sexta placa de Si da segunda irradiação.

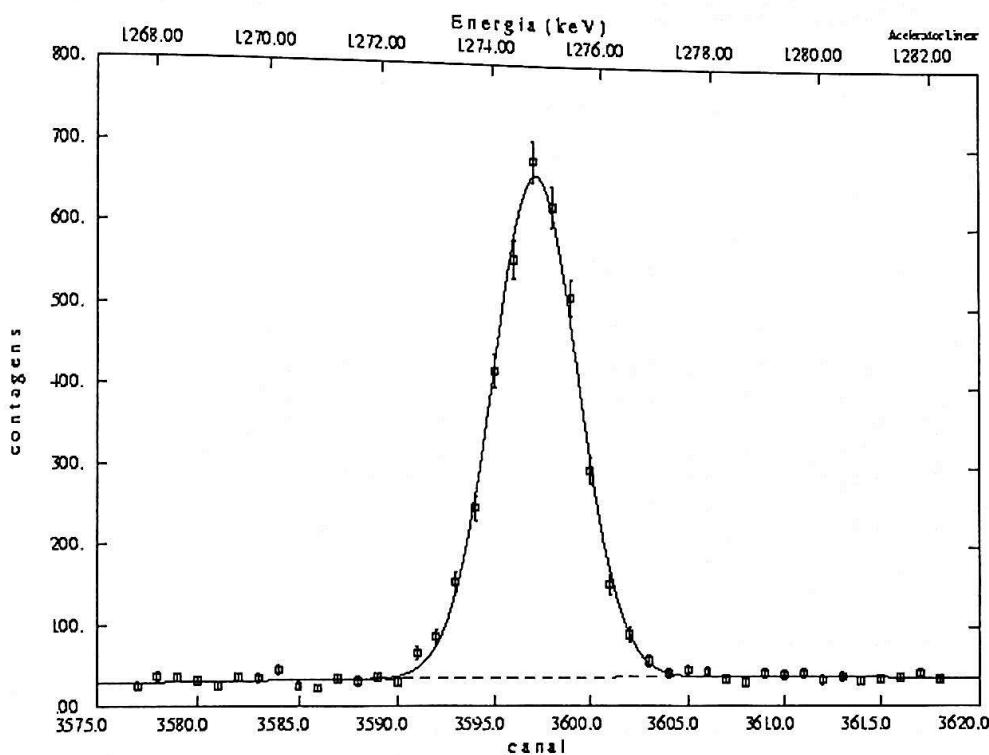


Fig. 2.18 - Ajuste do pico de 1274 keV do  $^{22}\text{Na}$  referente à primeira placa de Si da segunda irradiação.

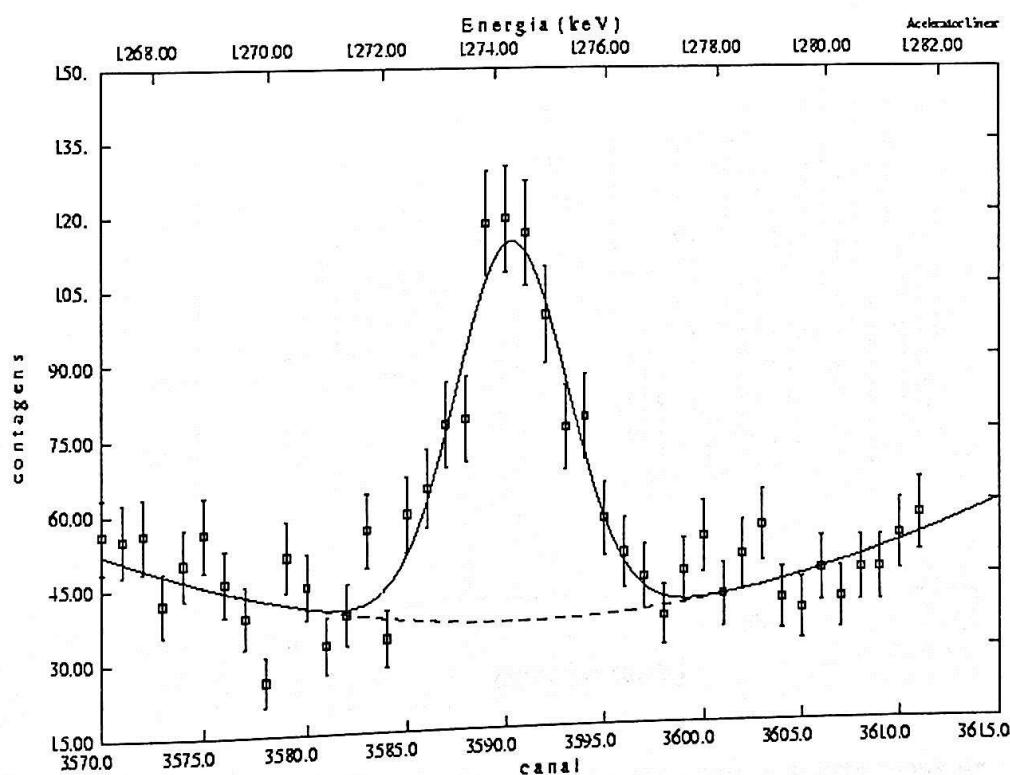


Fig. 2.19 - Ajuste do pico de 1274 keV do  $^{22}\text{Na}$  referente à segunda placa de Si da segunda irradiação.

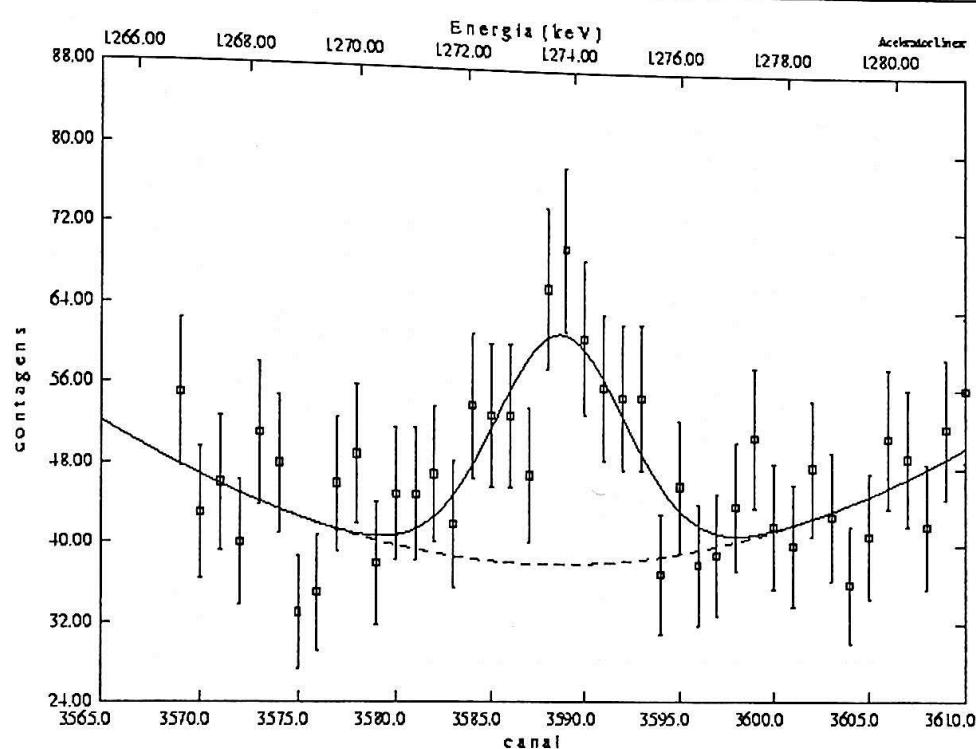


Fig. 2.20 - Ajuste do pico de 1274 keV do  $^{22}\text{Na}$  referente à terceira placa de Si da segunda irradiação.

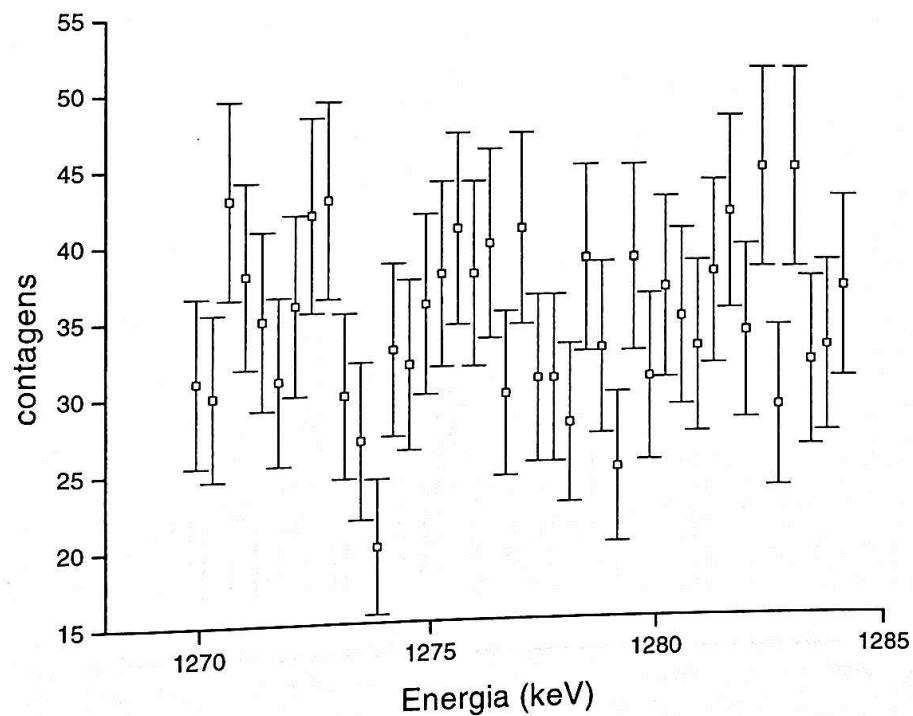


Fig. 2.21 - Região de 1274 keV referente à quarta placa de Si na segunda irradiação evidenciando a ausência de pico.

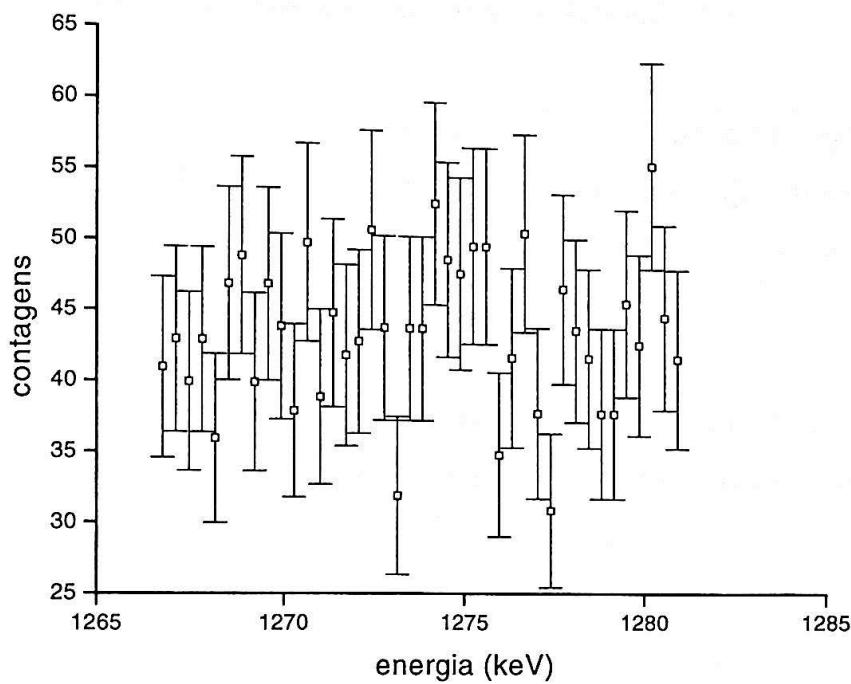


Fig. 2.22 - Região de 1274 keV referente à quinta placa de Si na segunda irradiação evidenciando a ausência de pico.

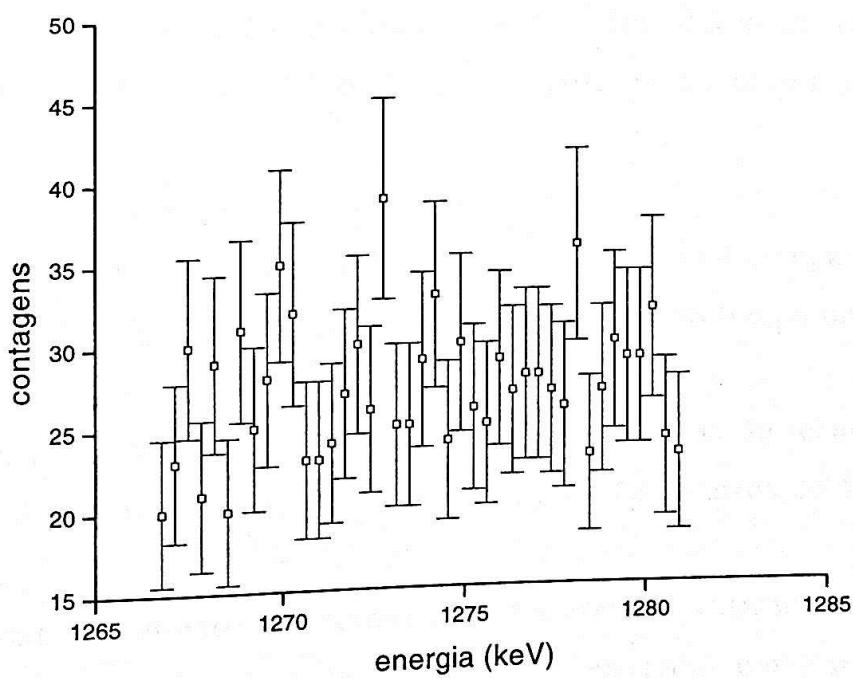


Fig. 2.23 - Região de 1274 keV referente à sexta placa de Si na segunda irradiação evidenciando a ausência de pico.

## 2.9 Análise da Impureza de $^{23}\text{Na}$ na Amostra de Silício

O  $^{23}\text{Na}$  possui um valor elevado da seção de choque para captura de nêutrons, 0,5 b, desta forma é possível através da detecção do  $^{24}\text{Na}$ , que possui uma linha em 1368 keV, fazer uma quantificação do número de átomos de  $^{23}\text{Na}$  contido na amostra de silício.

Foi feita uma irradiação de uma massa de silício de 114 mg no reator do IPEN com um fluxo de nêutrons  $\phi=10^{13}$  nêutrons/cm<sup>2</sup>.s. A amostra foi irradiada por 2 horas.

O cálculo é feito utilizando-se a expressão a seguir:

$$n_{^{23}\text{Na}} = \left( \frac{dN}{dt} \right)_{^{24}\text{Na}} \cdot \frac{\tau_{^{24}\text{Na}}}{\sigma_{^{23}\text{Na}} \cdot \phi \cdot t} \quad (2.21)$$

onde  $(dN/dt)$  é a atividade de  $^{24}\text{Na}$  produzida devidamente corrigida para o dia da irradiação e pela eficiência,  $\tau$  é a vida-média do  $^{24}\text{Na}$ ,  $\sigma$  é a seção de choque para captura de nêutrons do  $^{23}\text{Na}$ ,  $\phi$  é o fluxo de nêutrons do reator e  $t$  é o tempo de irradiação.

Como o tempo de meia-vida do  $^{24}\text{Na}$  ( $t_{1/2} \approx 15$  horas) é comparável ao tempo de medida a expressão (2.9) deve ser devidamente integrada no tempo de medida.

A medida da amostra irradiada foi feita após 31 horas do término da irradiação em decorrência de sua alta atividade. Foram medidos 7 espectros de 4 horas cada.

A razão entre o número de átomos de  $^{23}\text{Na}$  presentes na amostra e o número de átomos de silício é (o resultado abaixo foi enviado para o Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica, uma vez que os pesquisadores que forneceram as amostras de silício têm interesse neste dado):

$$\frac{n_{^{23}Na}}{n_{Si}} = 0,570(61) \times 10^{-12}$$

ou seja, pode-se desprezar a quantidade de  $^{22}\text{Na}$  proveniente da impureza de  $^{23}\text{Na}$  contida nas placas de silício.

## 2.10 Análise da Amostra de Magnésio

O magnésio foi medido durante 1 hora a uma distância de aproximadamente 20 cm do detector devido à sua atividade. A tabela 2.17 referente à análise do espectro do magnésio e o pico ajustado para a energia de 1274 keV do  $^{22}\text{Na}$  serão apresentados a seguir.

Magnésio			
Energia (keV)	I(%)	Área ( $\times 10^4$ )	Origem
122,106(21)	85,5(4)	1,67(7)	$^{57}\text{Co}$
159,48(20)	68(2)	0,38(11)	$^{47}\text{Sc}$
184,47(5)	20,4(4)	1,177(16)	$^{67}\text{Ga}$
477,70(4)	-	0,89(9)	-
511,052(10)	-	1654,4(5)	$e^+e^-$
596,76(17)	-	3,79(6)	empilhamento 511+85
744,22(15)	90,0(19)	0,32(4)	$^{52}\text{Mn}$
803,08(5)	-	0,37(3)	-
834,900(16)	99,975(2)	1,86(4)	$^{54}\text{Mn}$
846,830(17)	99,9	1,51(4)	$^{56}\text{Co}$
935,87(12)	94,5(20)	0,13(4)	$^{52}\text{Mn}$
983,21(18)	100	0,26(10)	$^{48}\text{Sc}$
1037,71(13)	14,1	0,5(3)	$^{56}\text{Co} + ^{48}\text{Sc}$
1115,63(5)	50,75(1)	0,42(6)	$^{65}\text{Zn}$
1238,40(3)	67,0(13)	0,685(28)	$^{56}\text{Co}$
1274,673(10)	99,937(15)	334,76(23)	$^{22}\text{Na}$
1355,44(3)	-	0,76(4)	empilhamento 511+846
1434,27(8)	98,2(20)	0,097(23)	$^{52}\text{Mn}$
1771,92(6)	15,5(3)	0,097(6)	$^{56}\text{Co}$
1786,017(4)	-	17,27(7)	soma 511+1274
2016,18(12)	3,03(6)	0,0214(26)	$^{56}\text{Co}$
2598,65(4)	16,7(3)	0,083(3)	$^{56}\text{Co}$

Tabela 2.17 - Dados referentes à análise do espectro do magnésio.

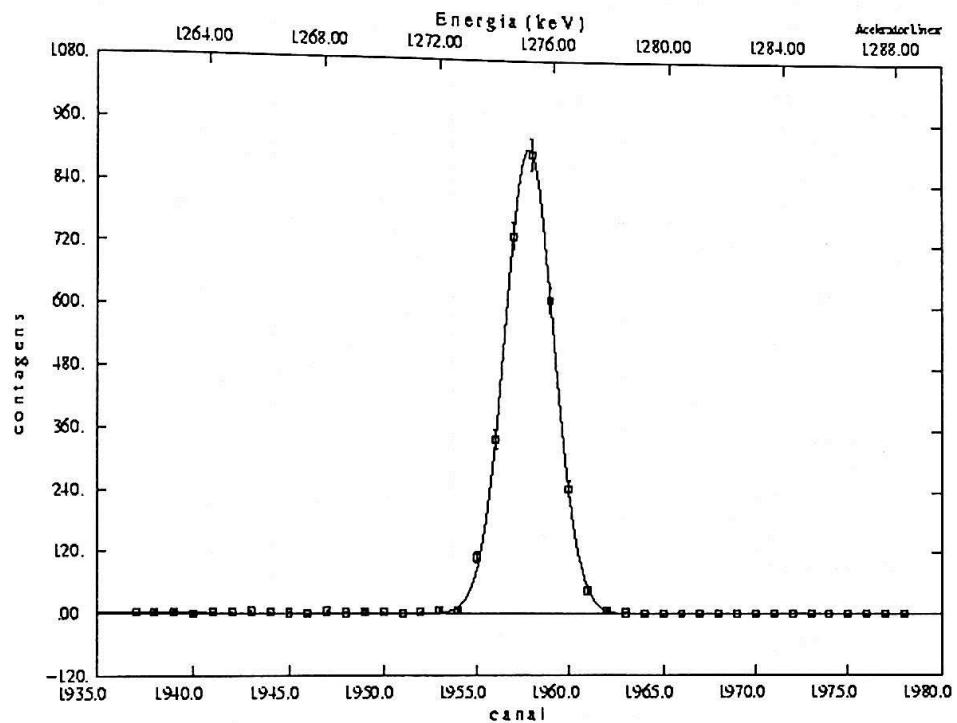


Figura 2.24 - Ajuste realizado para o pico de 1274 keV no espectro do magnésio.

## 2.11 Análise da Amostra de Titânio

O espectro do titânio analisado a seguir foi medido durante 24 horas. A maioria dos picos presentes no espectro foi identificado. O pico referente ao  $^{42}\text{K}$  (1525 keV) não apareceu. A seguir será apresentada a tabela de análise do espectro do titânio.

Titânio			
Energia (keV)	I(%)	Área ( $\times 10^4$ )	Origem
159,4120(10)	68(2)	174,90(16)	$^{47}\text{Sc}$
271,2260(10)	86,6	49,65(13)	$^{44\text{m}}\text{Sc}$
372,6800(20)	22,0	26,30(10)	$^{43}\text{Sc}$
477,15(7)	20,2(14)	0,54(7)	$^{55}\text{Co}$
510,9690(10)	-	3702,6(8)	$\beta^+/\beta^-$
548,510(14)	15,2(8)	1,23(3)	$^{62}\text{Zn}$
596,754(10)	- / 25,7	2,08(4)	Soma 511 + 85 / $^{62}\text{Zn}$
720,476(19)	0,154(12)	11,08(4)	$^{45}\text{Ti}$
802,17(14)	0,150(20)	0,62(16)	$^{48}\text{V}$
889,533(9)	99,984(1)	2,26(4)	$^{46\text{g}}\text{Sc}$
928,602(20)	0,77(5)	1,08(4)	$^{48}\text{V}$
931,527(24)	75	0,92(3)	$^{55}\text{Co}$
944,388(3)	7,76(9)	10,20(5)	$^{48}\text{V}$
983,7710(10)	99,99 / 100,0	126,71(15)	$^{48}\text{V} / ^{48}\text{Sc}$
1002,198	1,390(9)	0,30(4)	$^{44\text{m}}\text{Sc}$
1021,407(19)	-	3,55(10)	empilhamento 511 + 511
1037,739(12)	97,5(3)	1,63(3)	$^{48}\text{Sc}$
1120,728(9)	99,987(1)	1,814(25)	$^{46\text{g}}\text{Sc}$
1126,31(6)	1,390(9)	0,235(16)	$^{44\text{m}}\text{Sc}$
1157,1350(10)	1,390(9)	102,79(13)	$^{44\text{m+g}}\text{Sc}$
1218,19(13)	-	0,069(9)	Duplo Escape 2240
1312,0690(10)	97,49(20) / 100,0	98,54(13)	$^{48}\text{V} / ^{48}\text{Sc}$
1345,84(14)	-	0,033(7)	-
1369,61(12)	2,92(22)	0,039(7)	$^{55}\text{Co}$
1408,709(16)	0,085(9) / 16,9(3)	0,514(10)	$^{45}\text{Ti} / ^{55}\text{Co}$
1437,17(4)	0,120(20)	0,108(7)	$^{48}\text{V}$
1493,86(3)	-	0,210(7)	empilhamento e soma 983 + 511
1499,192(12)	0,910(18)	0,720(11)	$^{44\text{g}}\text{Sc}$
1661,40(4)	0,041(4)	0,206(10)	$^{45}\text{Ti}$
1666,890(22)	-	0,612(13)	soma 511 + 1157
1728,29(6)	-	0,111(9)	escape simples 2240
1794,58(9)	0,192	0,033(4)	$^{47}\text{V}$
1821,50(4)	-	0,235(11)	empilhamento e soma 1312 + 511
2160,48(14)	-	0,0108(22)	soma 1002 + 1157
2240,511(9)	2,41(4)	1,4295(12)	$^{48}\text{V}$
2292,24(4)	-	0,086(4)	empilhamento e soma 1312 + 983
2656,28(5)	0,112(3)	0,0596(28)	$^{44\text{g}}\text{Sc}$

Tab 2.18 - Análise do espectro de 24 h referente à folha de Ti.

Os ajustes dos picos mais intensos referentes ao  $^{43,44\text{m},44\text{g},46\text{g},47,48}\text{Sc}$  serão mostrados a seguir.

ESPECTROSCOPIA SIMPLES

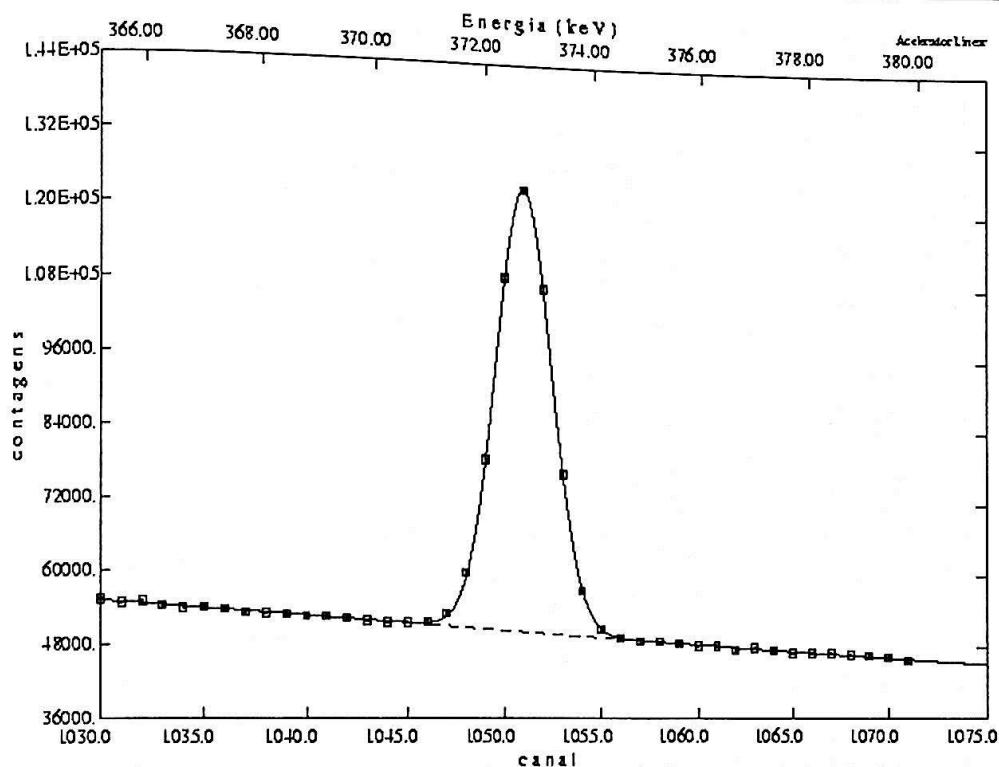


Fig. 2.25 - Ajuste do pico de 372 keV proveniente do  $^{43}\text{Sc}$ .

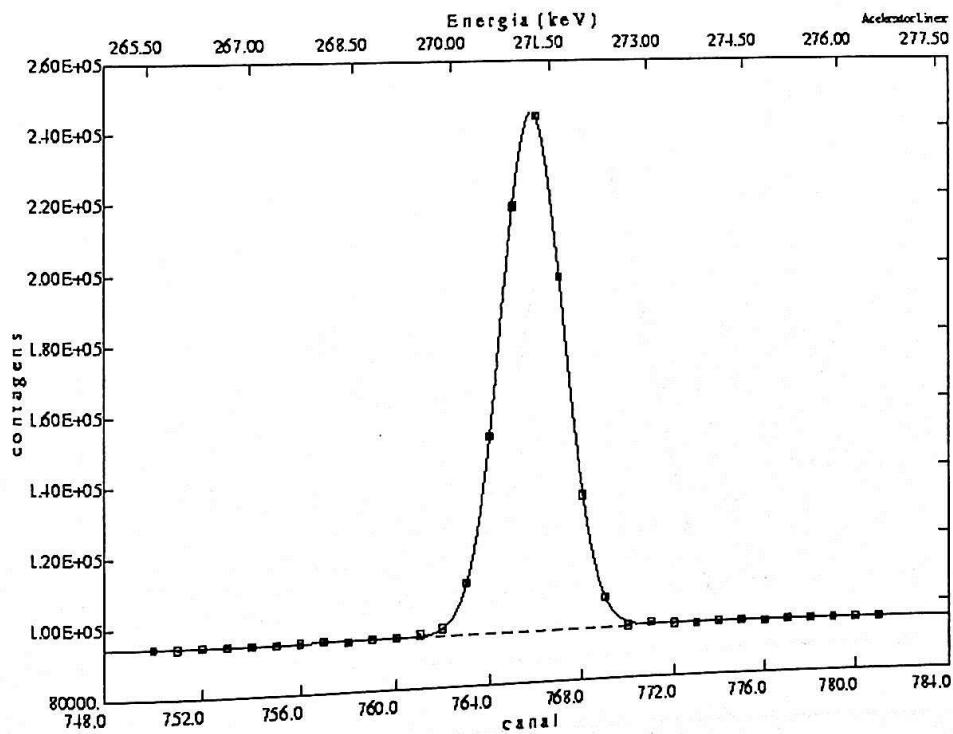


Fig. 2.26 - Ajuste do pico de 271 keV proveniente do  $^{44\text{m}}\text{Sc}$  ( $t_{1/2} = 2,4 \text{ d}$ ).

Tombo: 348  
 Informações  
 SERVIÇO DE BIBLIOTECA E  
 INSTITUTO DE FÍSICA

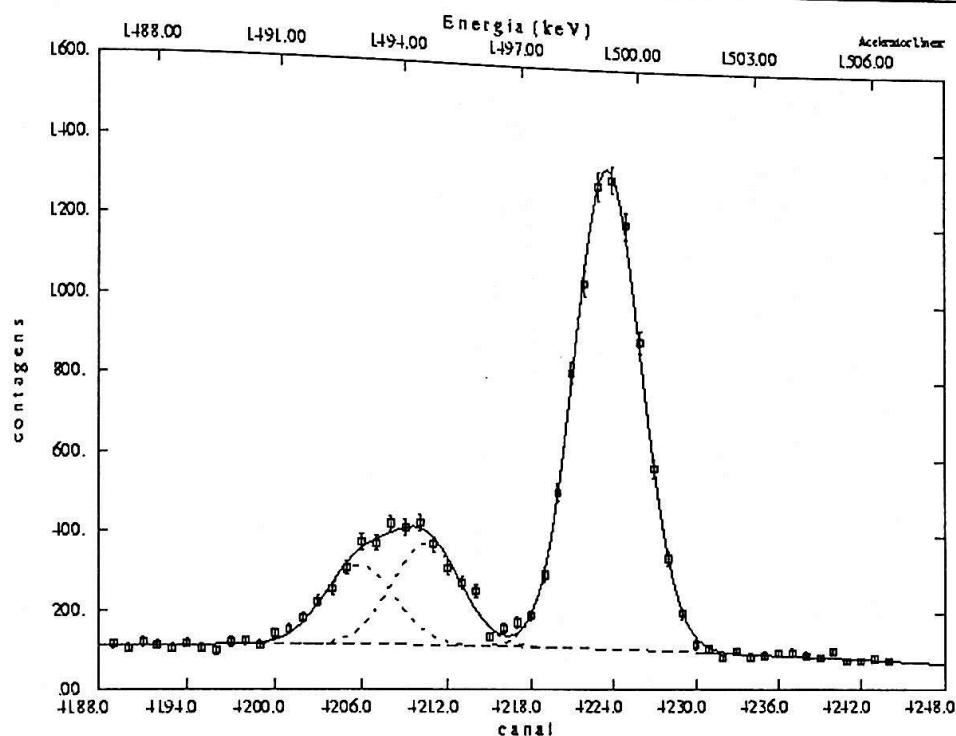


Fig. 2.27 - Ajuste do pico de 1499 keV (segundo pico, o primeiro pico corresponde ao empilhamento e soma do 983 e 511 keV proveniente do  $^{44}\text{Sc}$  ( $t_{1/2} = 3,9$  h)).

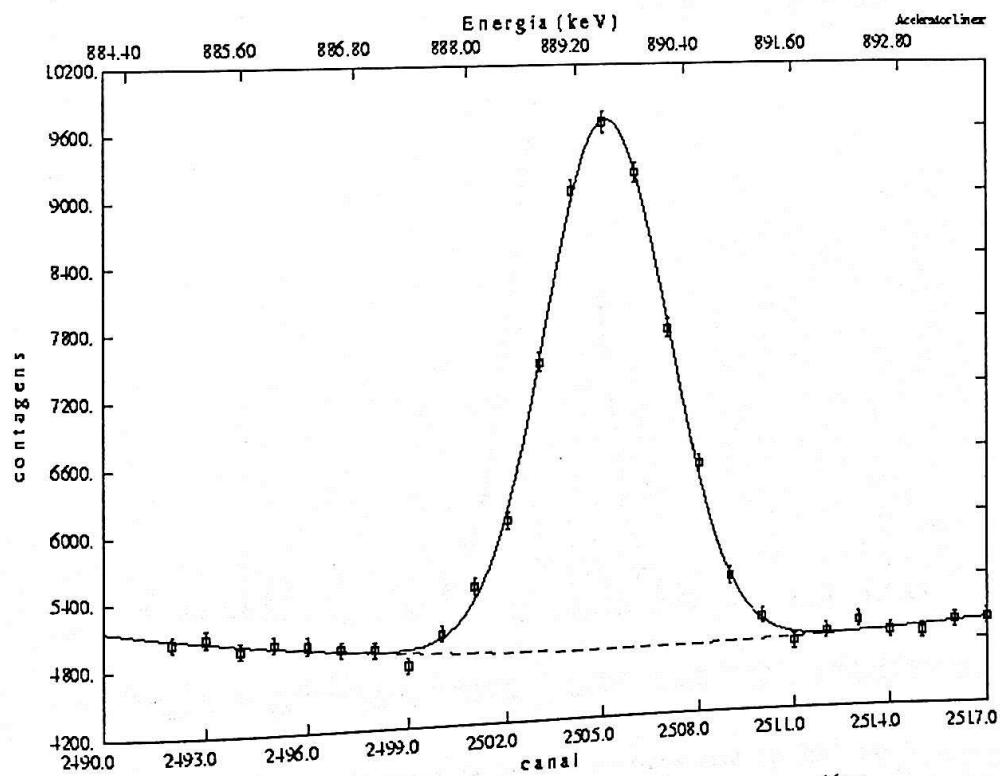


Fig. 2.28 - Ajuste do pico de 889 keV proveniente do  $^{46}\text{Sc}$ .

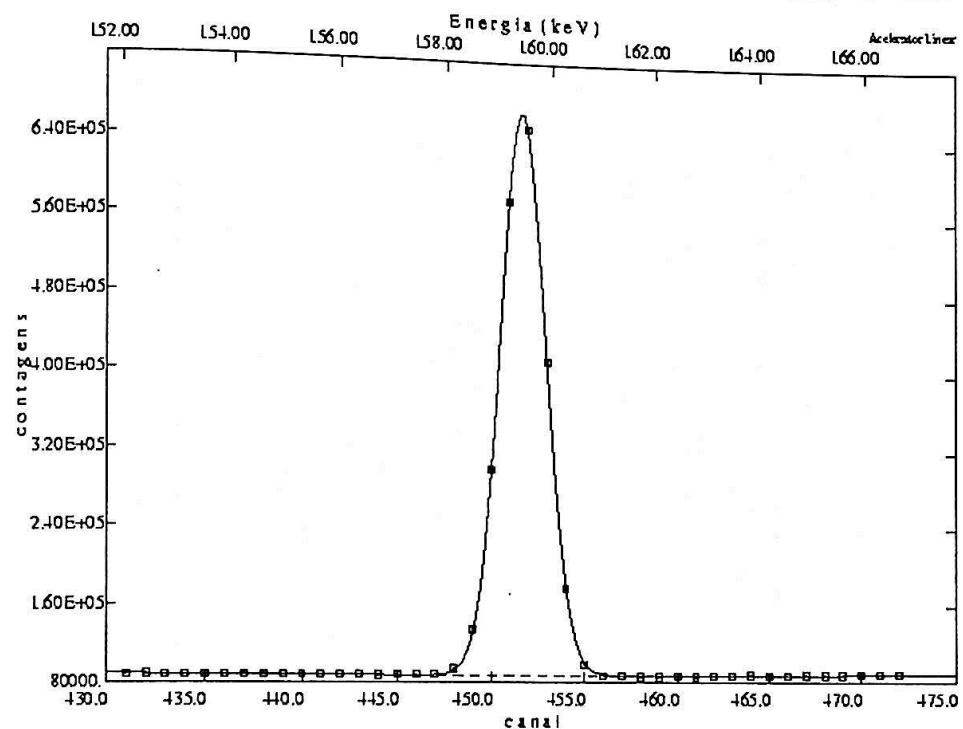


Fig. 2.29 - Ajuste do pico de 159 keV proveniente do  $^{47}\text{Sc}$ .

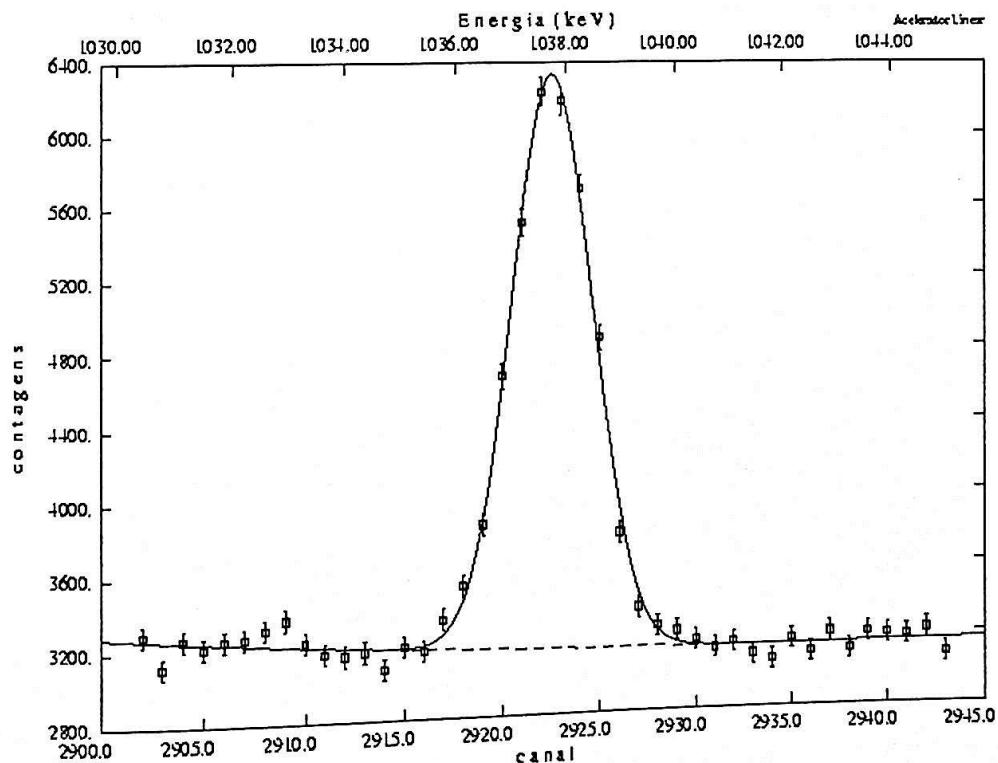


Fig. 2.30 - Ajuste do pico de 1037 keV proveniente do  $^{48}\text{Sc}$ .

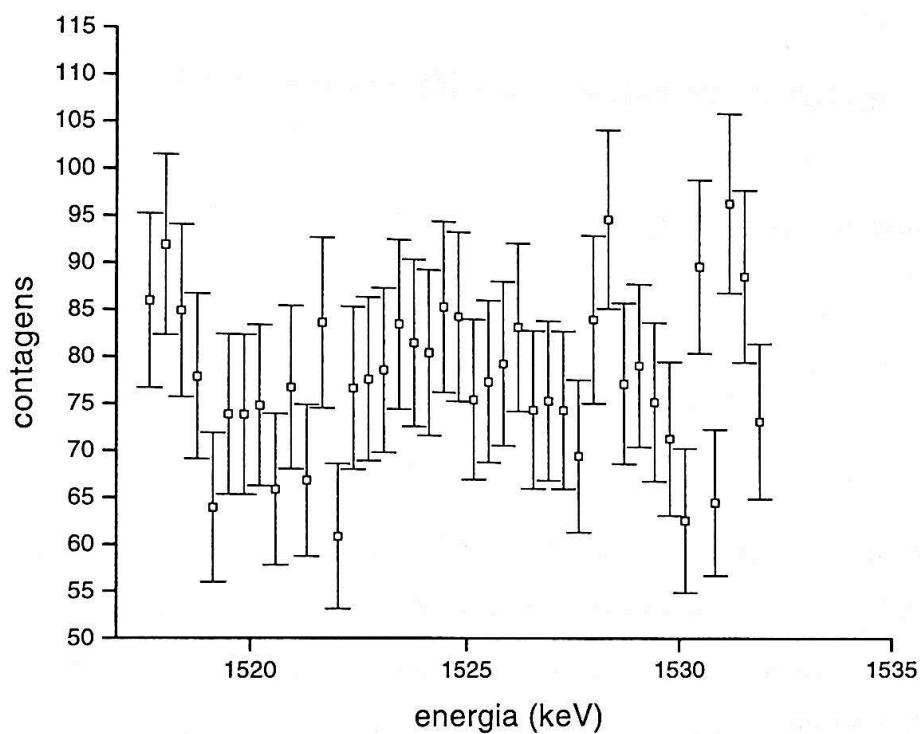


Fig. 2.31 - Região de 1525 keV referente à placa de Ti evidenciando a ausência de pico.

## Capítulo 3

### Cálculo das Seções de Choque e Discussão dos Resultados

O número de desintegrações por unidade de tempo,  $dN/dt$ , do produto formado é dado por:

$$\frac{dN_{produto}}{dt} = N_{alvo} i \sigma - \lambda N_{produto} \quad (3.1)$$

onde  $\lambda$  é a constante de decaimento do produto,  $N_{alvo}$  é o número de átomos alvo por unidade de área,  $N_{produto}$  é o número de átomos produzido pela reação de interesse,  $\sigma$  é a seção de choque da reação e  $it_i$  é a corrente integrada do feixe de prótons.

Como o tempo de irradiação é muito menor que a meia-vida do elemento produzido, despreza-se a segunda parcela da equação (3.1)

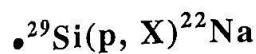
$$\frac{dN_{produto}}{dt} = \lambda N_{alvo} \sigma it_i \quad (3.2)$$

desta forma a seção de choque pode ser obtida através da medida da atividade residual da amostra irradiada, devidamente corrigida para o dia da medida:

$$\sigma = \frac{\tau \cdot \frac{dN_{produto}}{dt}}{N_{alvo} \cdot it_i} \quad (3.3)$$

onde  $\tau$  é a vida-média ( $\tau = \frac{1}{\lambda}$ ).

A seguir serão apresentadas as seções de choque para as reações de interesse:



PRIMEIRA IRRADIAÇÃO:

- ⇒ Lâmina 1 (23,69(14) MeV): 66(3)  $\mu\text{b}$
- ⇒ Lâmina 2 (22,87(14) MeV): 15,4(9)  $\mu\text{b}$
- ⇒ Lâmina 3 (22,02(15) MeV): 1,0(4)  $\mu\text{b}$
- ⇒ Lâmina 4 (21,15(15) MeV): 9,0(8)  $\mu\text{b}$
- ⇒ Lâmina 5 (20,25(16) MeV): não apareceu
- ⇒ Lâmina 6 (19,32(16) MeV): 2,1(5)  $\mu\text{b}$

SEGUNDA IRRADIAÇÃO:

- ⇒ Lâmina 1 (21,20(15) MeV): 25,4(9)  $\mu\text{b}$
- ⇒ Lâmina 2 (18,96(16) MeV): 4,1(4)  $\mu\text{b}$
- ⇒ Lâmina 3 (16,50(18) MeV): 0,92(28)  $\mu\text{b}$

As lâminas posteriores foram irradiadas com uma energia (vide Tab.2.2) abaixo do limiar de ocorrência da reação ( $Q = -14273,7(5)$  keV [Fi96]).

Um gráfico referente aos valores acima é apresentado na Figura 3.1. Será feita uma comparação com os dados experimentais de [Wa76]. A escassez de dados de seção de choque na faixa de energia estudada é bastante grande na literatura. A grande maioria dos artigos apresenta dados para energias maiores que 25 MeV.

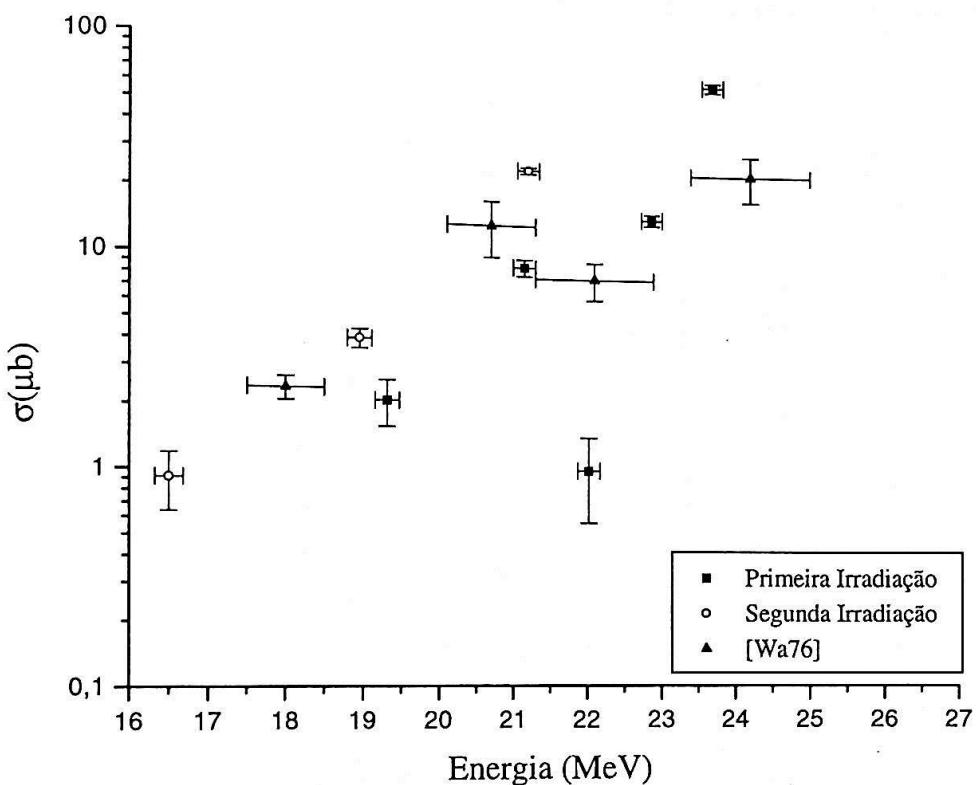


Fig. 3.1 - Seções de choque para formação de  $^{22}\text{Na}$  a partir do  $^{29}\text{Si}$ .

Nota-se a partir da Figura 3.1 que os pontos referentes à primeira irradiação apresentam algumas irregularidades. O ponto referente à segunda placa apresenta um valor maior que aquele calculado para a terceira placa, mostrando um comportamento diferente dos pontos da segunda irradiação e dos pontos da ref.[Wa76]. Isso se deve principalmente à fragmentação das lâminas de silício devido à pressão mecânica exercida pelo porta-amostras utilizado na irradiação (esse fato provavelmente deve ser a causa do não aparecimento do pico de 1274 keV na quinta lâmina de silício). A perda de massa nas amostras mesmo em pequenas proporções afeta substancialmente o experimento, levando-se em conta a baixa seção de choque da reação a ser estudada e consequentemente a formação reduzida do elemento de interesse  $^{22}\text{Na}$ .

A pequena formação do  $^{22}\text{Na}$  também acarreta o aumento da incerteza nas seções de choque proveniente, principalmente, da baixa estatística dos picos de 1274 keV nos espectros analisados.

### CAPÍTULO 3 - CÁLCULO DAS SEÇÕES DE CHOQUE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O gráfico mostrado a seguir [Fu71] também mostra dados de seção de choque para formação de  $^{22}\text{Na}$  a partir de silício natural para energias maiores que 25 MeV do feixe de prótons.

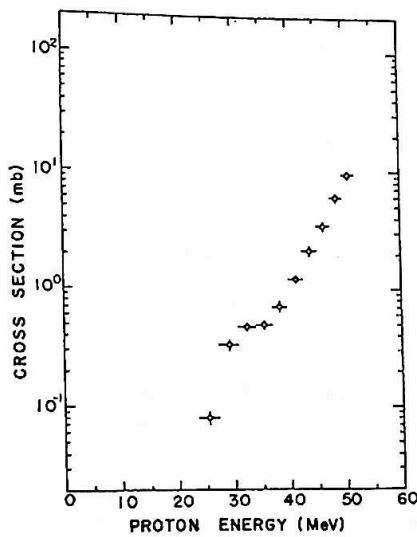
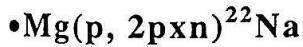


Fig.3.2 - Seções de choque para formação de  $^{22}\text{Na}$  a partir de silício natural [Fu71].



A seção de choque calculada para a reação acima foi:

Energia dos prótons incidentes: 22,6(3) MeV

Seção de Choque:  $\sigma = 42,7(8)$  mb

A falta de dados experimentais para energias próximas ao limiar também acontece no caso do magnésio. A maioria dos dados existentes é para energias maiores que 25 MeV do feixe de prótons incidentes, como é o caso das referências [Ha77] [La90].

O gráfico a seguir mostra uma função de excitação para a reação Mg(p, X) $^{22}\text{Na}$  [Bo93] com pontos experimentais de diversos artigos.

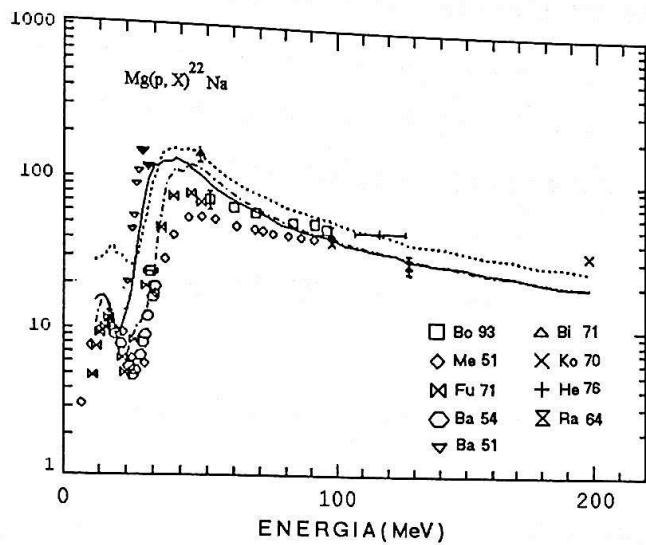


Fig. 3.3 - Função de excitação para produção de  $^{22}Na$  a partir do magnésio.

Conforme foi citado no primeiro parágrafo a maioria dos trabalhos existentes na literatura apresentam dados experimentais numa região de energia bem maior do que a estudada no presente trabalho. A Figura 3.4 mostra os pontos experimentais de [Fu71] numa escala menor de energia.

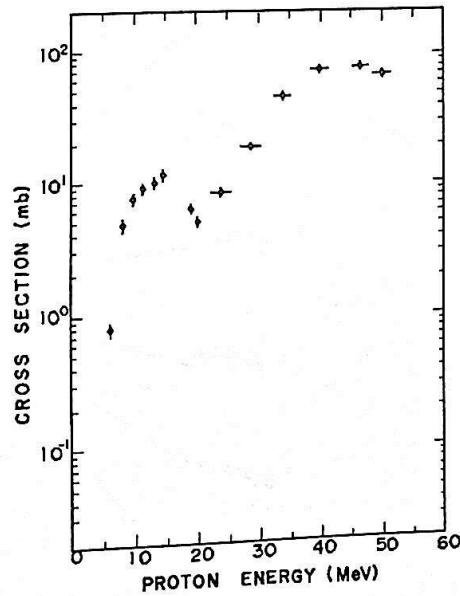
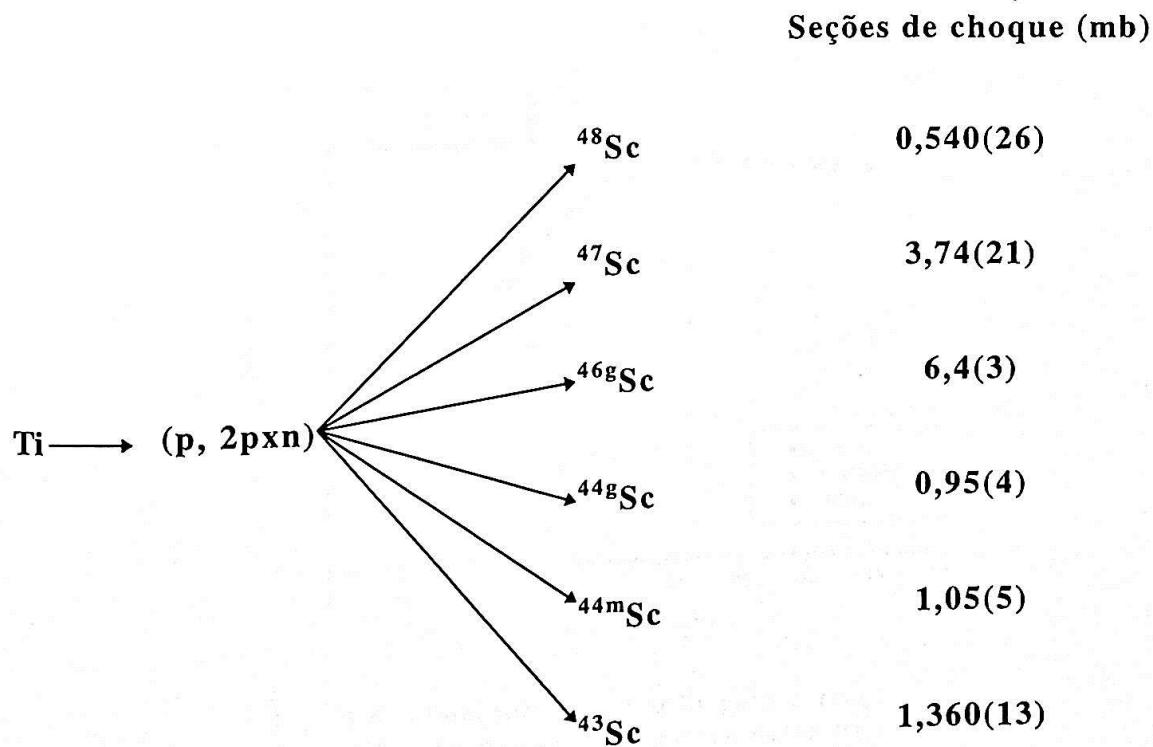


Fig. 3.4 - Função de excitação para produção de  $^{22}Na$  a partir do magnésio próximo às energias de interesse [Fu71].

A seção de choque obtida neste trabalho apresenta um valor superior aos pontos apresentados na fig. 3.4. Este fato pode estar associado à hipótese de que a formação do  $^{22}\text{Na}$  não venha exclusivamente da reação  $\text{Mg}(\text{p}, \text{X})^{22}\text{Na}$ , ou seja, alguma impureza pode também estar contribuindo de alguma forma para formação do  $^{22}\text{Na}$ .

•Reações no titânio -  $\text{Ti}(\text{p}, 2\text{pxn})^{48,47,46\text{g},44\text{g},44\text{m},43}\text{Sc}$

O pequeno tempo de irradiação do titânio impossibilitou a observação do  $^{42}\text{K}$  ( $t_{1/2} = 12$  h), já que o tempo de irradiação teve que ser calculado utilizando como referência a formação de  $^{48}\text{V}$  e  $^{46}\text{Sc}$ , principais interferências. Seções de choque obtidas utilizando os picos do espectro do titânio apresentados na seção 2.11 são mostradas a seguir.



As Figuras 3.5 a 3.10 apresentam os gráficos referentes às funções de excitação [Mi78][Ko93] das reações acima.

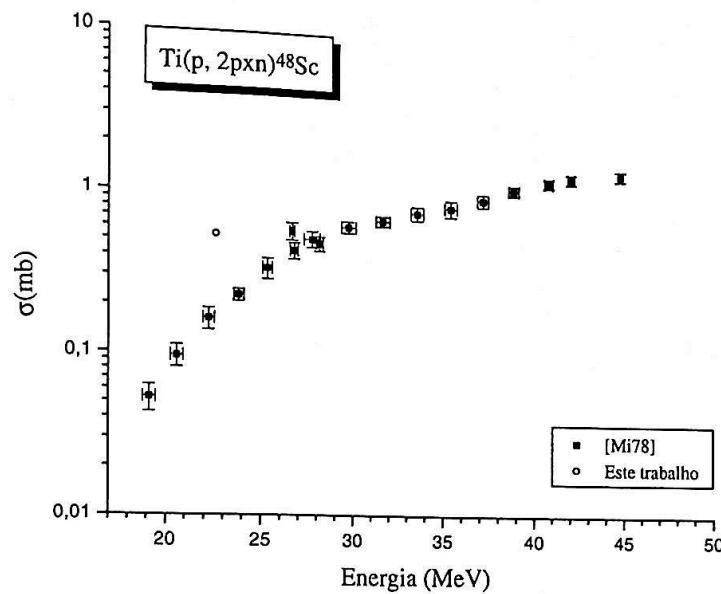


Fig. 3.5 - Função de excitação para a reação  $\text{Ti}(p, 2pxn)^{48}\text{Sc}$ . As barras de incerteza deste trabalho são da dimensão do ponto no gráfico.

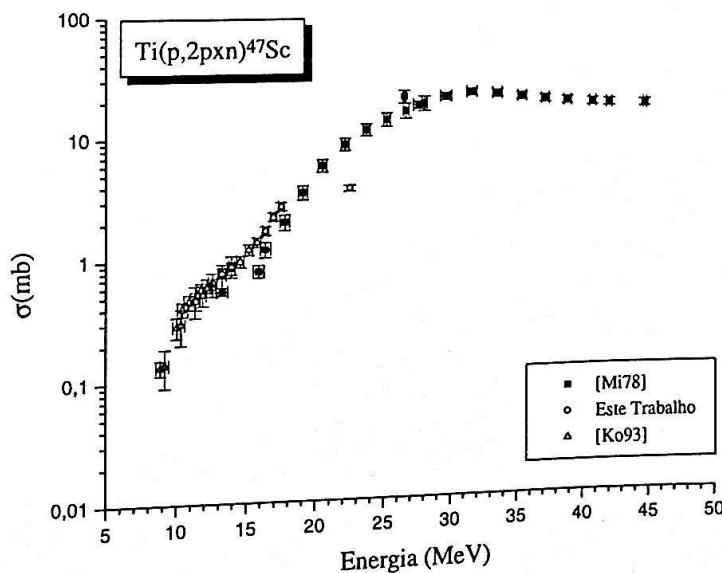
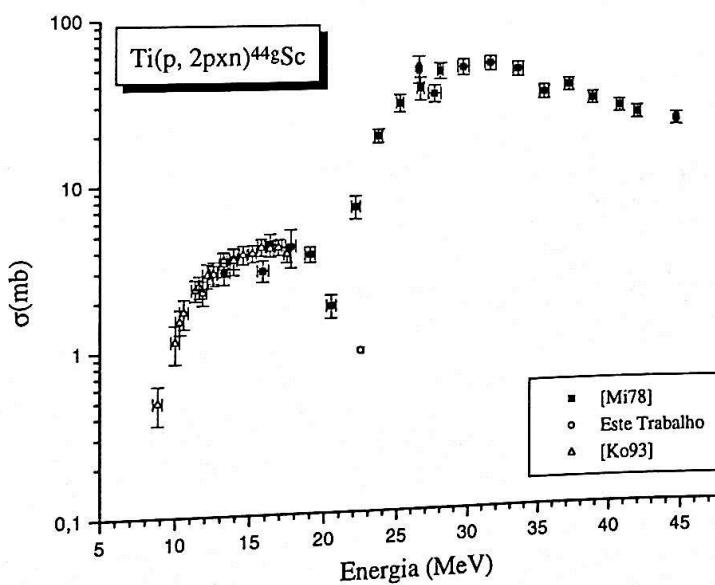
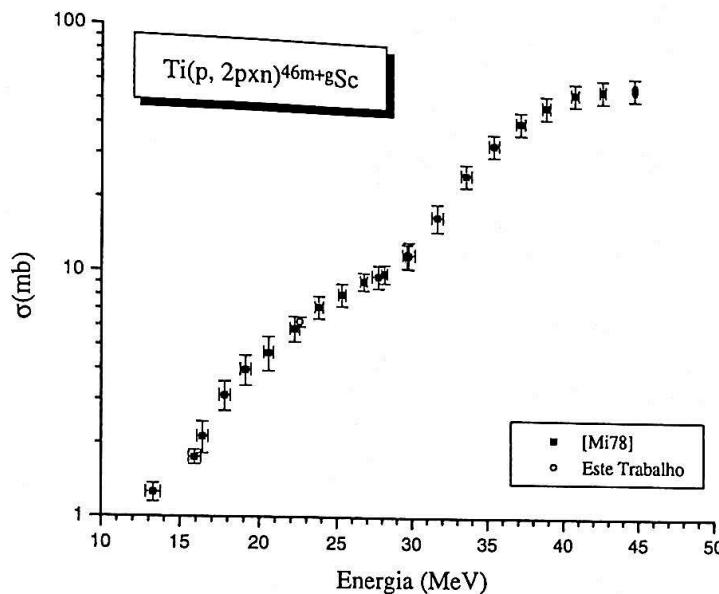
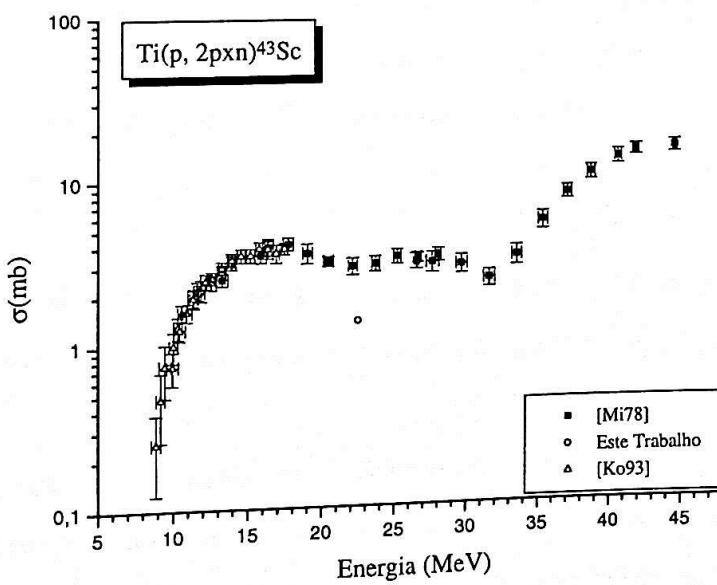
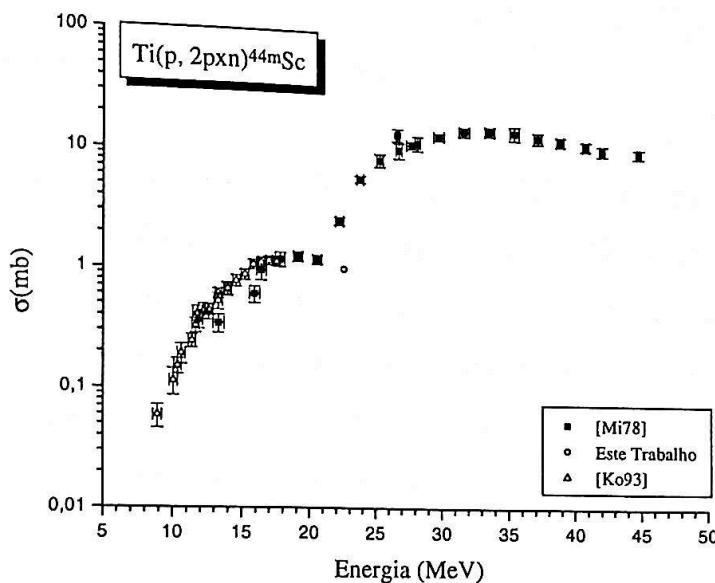


Fig. 3.6 - Função de excitação para a reação  $\text{Ti}(p, 2pxn)^{47}\text{Sc}$ . As barras de incerteza deste trabalho da energia são da dimensão do ponto no gráfico.





### 3.1 Presença de Impurezas nas Amostras

Conforme visto na seção 2.8 a presença de sódio na amostra de silício é praticamente desprezível. Porém, o grande número de picos apresentados nas tabelas de análise dos espectros mostra a presença de outras impurezas nas amostras. Na Tabela 3.1 será apresentada as possíveis impurezas acompanhadas das prováveis reações formadores dos nuclídeos detectados. As possíveis reações formadoras dos elementos de interesse também estão nessa tabela.

Entre as impurezas encontradas destaca-se a presença de Fe, compatível com eventuais procedimentos mecânicos de preparação de amostras. O  $^{22}\text{Na}$  que aparece não é proveniente do  $^{23}\text{Na}$  como impureza, pois embora o sódio pudesse produzir  $^{22}\text{Na}$  pela reação  $^{23}\text{Na}(\text{p}, \text{pn})^{22}\text{Na}$ ,  $Q = -3,724 \text{ MeV}$ , o próprio comportamento do "yield" da reação exclui esta possibilidade, pois foi impossível detectar qualquer presença da linha de 1274 keV nas últimas placas da pilha. Medida feita com captura de nêutrons térmicos (vide seção 2.9) em amostra menos regular de maior massa, e não elaborada mecanicamente, demonstra que o  $^{23}\text{Na}$  aparece, sob todos os pontos de vista, numa proporção negligenciável.

Conforme já foi mencionado a principal impureza é o Fe, as outras impurezas aparecem bem menos, numa proporção de algumas ppb (partes por bilhão) ou menos.

A presença de impurezas nas diversas placas do "stacked-foil" teve seu comportamento interpretado no limite do possível, uma vez que a adição destas impurezas no processo de preparação das amostras não pode ser considerado como um processo padronizado.

Nuclídeos Formados			
Nuclídeo Detectado	Alvo	Possível Reação	Q (MeV)
<sup>22</sup> Na	<sup>29</sup> Si	(p, 2α)	-14,269
	<sup>25</sup> Mg	(p, α)	-3,142
	<sup>26</sup> Mg	(p, αn)	-14,235
<sup>43</sup> Sc	<sup>46</sup> Ti	(p, α)	-3,073
	<sup>47</sup> Ti	(p, αn)	-11,950
<sup>44</sup> Sc	<sup>46</sup> Ti	(p, 2pn)	-21,670
		(p, <sup>3</sup> He)	-13,952
	<sup>47</sup> Ti	(p, α)	-2,251
	<sup>48</sup> Ti	(p, α)	-5,807
<sup>44m</sup> Sc	<sup>46</sup> Ti	(p, 2pn)	-21,941
		(p, <sup>3</sup> He)	-14,223
	<sup>47</sup> Ti	(p, α)	-2,522
	<sup>48</sup> Ti	(p, α)	-6,078
<sup>46g</sup> Sc	<sup>47</sup> Ti	(p, 2p)	-10,462
	<sup>48</sup> Ti	(p, 2pn)	-22,089
		(p, <sup>3</sup> He)	-14,371
	<sup>49</sup> Ti	(p, α)	-1,935
<sup>47</sup> Sc	<sup>50</sup> Ti	(p, αn)	-12,874
	<sup>48</sup> Ti	(p, 2p)	-11,446
	<sup>49</sup> Ti	(p, 2pn)	-19,588
		(p, <sup>3</sup> He)	-11,870
<sup>48</sup> Sc	<sup>50</sup> Ti	(p, α)	-2,231
	<sup>49</sup> Ti	(p, 2p)	-11,355
	<sup>50</sup> Ti	(p, 2pn)	-22,294
		(p, <sup>3</sup> He)	-14,576
<sup>45</sup> Ti	<sup>46</sup> Ti	(p, pn)	-13,190
	<sup>47</sup> Ti	(p, p2n)	-22,067
<sup>47</sup> V	<sup>47</sup> Ti	(p, n)	-3,709
	<sup>48</sup> Ti	(p, 2n)	-15,336
<sup>48</sup> V	<sup>48</sup> Ti	(p, n)	-4,795
	<sup>49</sup> Ti	(p, 2n)	-12,937
<sup>51</sup> Cr	<sup>52</sup> Cr	(p, pn)	-12,038
	<sup>53</sup> Cr	(p, p2n)	-19,977
<sup>52m</sup> Mn	<sup>52</sup> Cr	(p, n)	-5,494
	<sup>53</sup> Cr	(p, 2n)	-13,433
<sup>54</sup> Mn	<sup>54</sup> Cr	(p, n)	-2,159
<sup>55</sup> Co	<sup>56</sup> Fe	(p, 2n)	-15,431
<sup>56</sup> Co	<sup>56</sup> Fe	(p, n)	-5,348
	<sup>57</sup> Fe	(p, 2n)	-12,994
<sup>57</sup> Co	<sup>57</sup> Fe	(p, n)	-1,618
	<sup>58</sup> Fe	(p, 2n)	-11,662
<sup>65</sup> Zn	<sup>66</sup> Zn	(p, pn)	-11,059
	<sup>67</sup> Zn	(p, p2n)	-18,111
<sup>57</sup> Ni	<sup>58</sup> Ni	(p, pn)	-12,219
<sup>67</sup> Ga	<sup>67</sup> Zn	(p, n)	-1,576
	<sup>68</sup> Zn	(p, 2n)	-11,774

Tab 3.1 - Valores de Q para as possíveis reações formadoras dos nuclídeos detectados nos espectros. Os valores de Q foram retirados de J.K. Tuli [Tu90].

## Capítulo 4

### Conclusões e Perspectivas

Reações ( $p, 2\alpha$ ) já foram objetos de medida em nuclídeos leves em energias mais elevadas, nessas energias o valor de referência para seção de choque pode se tornar da ordem de dezenas de mb. Em energias mais próximas do limiar da reação uma otimização das condições experimentais torna-se necessária para superar as limitações dos parâmetros diretamente controláveis.

Escolhas adequadas de tempos de irradiação, tempo de espera, espessura da amostra, radiação gama característica e meias-vidas indicam os casos em que a medida é possível. Uma peculiaridade das reações em questão é que elas se tornam exoenergéticas para  $A = 100$ . Neste caso a barreira Coulombiana passa a ter um papel relevante, não fundamental neste trabalho. Estudos mais orientados poderiam permitir uma melhor compreensão do comportamento da reação que de maneira geral pode ser explicado utilizando o modelo de núcleo composto e propriedades estatísticas dos níveis.

A medida da reação  $^{29}\text{Si}(p, 2\alpha)^{22}\text{Na}$  foi efetuada apresentando resultados com limitações inerentes principalmente a uma determinação mais precisa da energia do ciclotron. Esta pode apresentar variações maiores do que aquela dada pela incerteza na tabela 2.2.

Uma importante contribuição do presente trabalho é o limite de detecção estabelecido. As condições experimentais permitem, dependendo da região do espectro, a observação de picos de até 1,5 contagens/h.

Além das impurezas, claramente um problema, a utilização de elementos naturais produz uma multiplicidade de reações cujo controle nem sempre é fácil. O

procedimento utilizado efetuando medidas nos casos onde ocorre separações claras de energias de transições características e meias-vidas atenuam as dificuldades, embora estas podem estar presentes se eventualmente nuclídeos com gamas mais elevados são produzidos acarretando uma cauda Compton considerável dificultando, assim, medidas na região de interesse.

A única medida anteriormente existente com energia do feixe de prótons menor que 25 MeV [Wa76] apresenta consistência com os resultados experimentais obtidos na presente experiência. O fundo radioativo foi um impedimento sério para estender a medida para valores mais próximos do limiar. Na primeira série de medidas a quebra de algumas lâminas de Si da pilha causou algum prejuízo à medida. Como ilustração da limitação do método, medida de seções de choque da ordem de  $\mu b$ , ver a figura 2.11 onde a região de 1274 keV está presente com dificuldade de uma determinação mais precisa da área devido ao baixo número de contagens, a área possui uma incerteza de quase 50% (ver Tabela 2.6).

A pureza em situações de meias-vidas longas e seções de choque muito pequenas tem um significado relativo, pois mesmo amostras com 99,999 % de pureza acabam por apresentar interferências que no caso deste trabalho foram controláveis.

Na medida de Walton [Wa76] as menores energias medidas correspondem às últimas placas da pilha com possibilidades de erro na energia que pode se tornar maior do que o assinalado pelos autores.

Repetições da irradiação utilizando a energia atual fornecida pelo ciclotron não levariam a uma determinação clara das seções de choque a não ser que fossem feitas diversas vezes, o que seria demais custoso. Como o valor da energia do ciclotron está abaixo do valor nominal, o restabelecimento deste valor, 24 MeV, poderia tornar a repetição da medida possível no futuro.

Em termos de perspectivas há toda uma série de constatações notáveis. Algumas reações estudadas em energias mais elevadas, consequência natural da sofisticação na tecnologia de máquinas nucleares, são possíveis utilizando um ciclotron limitado, de baixa energia - 24 MeV.

Uma família de reações que não foram comentadas no corpo da dissertação são as reações ( $p, 2p$ ) [Sh68][La90]. Técnicas de separação dos nuclídeos produzidos, associadas ao domínio, existente no laboratório, na determinação de transições muito fracas permitem o estudo dessas reações utilizando medidas de atividades residual em baixas energias do feixe de prótons. O mesmo estudo poderia ser feito para as reações ( $p, \alpha n$ ) que possuem um limiar da ordem das reações ( $p, 2p$ ). Uma escolha cuidadosa dos produtos finais tornam as medidas possíveis mesmo na presença de canais muito mais favorecidos, um exemplo de ( $p, 2p$ ) que poderia ser colocada como possível é  $^{25}\text{Mg}(p, 2p)^{24}\text{Na}$  ( $t_{1/2} = 15$  h) com gamas fáceis de medir.

Aceleradores mesmo limitados nas sua características ainda podem dar contribuições significativas à física nuclear, no sentido de entender a existência de diversas configurações nos núcleos além das já bem conhecidas partículas alfa.

## Referências

[Ba51]

F. O. Bartell, S. Soffsky, *Phys. Rev.*, 84, 463 (1951).

[Ba54]

R. E. Batzel, G. H. Coleman, *Phys. Rev.*, 93, 280 (1954).

[Ba85]

S. W. Barwick, P. B. Price, J. D. Stevenson, *Phys. Rev.*, 31, 1985 (1984).

[Bi71]

R. Bimbot, H. Gauvin, *CR Acad. Sci. (Paris)*, B273, 1054 (1971).

[Bo93]

R. Bodemann, H. -J. Lange, I. Leya, R. Michel, T. Schiekel, R. Rösel, U. Herpers, H. J. Hofmann, B. Dittrich, M. Suter, W. Wölfli, B. Holmqvist, H. Condé, P. Malmborg, *Nucl. Instr. Meth.* B82, 9 (1993).

[Br71]

R. L. Brodzinski, L. A. Rancitelli, J. A. Cooper, N. A. Wogman, *Phys. Rev. C4*, 1250 (1971).

[Br78]

E. Browne, J. M. Daikiri, R. E. Doeblar, *Table of Radioactive Isotopes, Seventh Edition*, Lawrence Berkeley National Laboratory - University of California (1978).

[Br86]

E. Browne, R. B. Firestone, *Table of Radioactive Isotopes*, Lawrence Berkeley National Laboratory - University of California (1986).

[Co54]

B. L. Cohen, H. L. Reynolds, A. Zucker, *Phys. Rev.*, 96, 1617 (1954).

[Co56]

B. L. Cohen, *Phys. Rev.*, 102, 453 (1956).

[De88]

K. Debertin, R. G. Helmer, *Gamma and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors*, North-Holland (1988).

[Fi90]

D. Fink, J. Sisterson, S. Vogt, G. Herzog, J. Klein, R. Middleton, A. Koehler, A. Magliss, *Nucl. Instr. Meth. B52*, 601 (1990).

[Fi96]

R. B. Firestone, *Table of Isotopes, Eighth Edition - Volume I*, Lawrence Berkeley National Laboratory - University of California (1996).

[Fi96a]

R. B. Firestone, *Table of Isotopes/CD-ROM, Eighth Edition - Version 1.0*, Lawrence Berkeley National Laboratory - University of California (1996).

[Fu71]

M. Furukawa, K. Shizuri, K. Komura, K. Sakamoto, S. Tanaka, *Nucl. Phys. A174*, 539 (1971).

[Go82]

P. Gouffon, *Manual do Programa Idefix*, LAL-IFUSP (1982).

[Go82a]

P. Gouffon, *Manual do Programa Obelix*, LAL-IFUSP (1982).

[Ha77]

F. J. Haasbroek, J. Steyn, R. D. Neirinckx, G. F. Burdzik, M. Cognneau, P. Wanet, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 28, 533 (1977).

[He76]

H. R. Heydecker, A. L. Turkevich, A. van Ginneken, P. H. Walpole, *Phys. Rev. C*, 14, 1506, (1976).

[He81]

O. A. M. Helene, V. R. Vanin, *Tratamento Estatístico de Dados em Física Experimental*, Edgard Blücher (1981).

[In91]

*International Atomic Energy Agency, X- Ray and Gamma-Ray Standards for Detectors Calibration*, Viena (1991), IAEA-TECDOC-619.

[Ko70]

R. R. Korteling, A. A. Caretto, Jr., *Phys. Rev. C1*, 1960 (1970).

[Ko85]

P. Kopecký, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 36, 657 (1985).

[Ko93]

P. Kopecký, F. Szelecsényi, T. Molnár, P. Mikecz, F. Tárkányi, *Appl. Radiat. Isot.*, 44, 687 (1993).

[La83]

M. C. Lagunas-Solar, M. J. Avila, N. J. Navarro, P. C. Johnson, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 34, 915 (1983).

[La90]

M. C. Lagunas-Solar, O. F. Carvacho, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 41, 349 (1990).

[Ma83]

G. R. Maughan, R. H. McCamis, N. T. Okumusoglu, W. T. H. van Oers, *J. Appl. Phys.*, 54 (1983).

[Ma96]

A.A. Malafronte, A. Passaro, M.A. Radovich, A.L. Bonini, *Rev. Fís. Apl. Instr.*, 11, 71 (1996).

[Me51]

J. W. Meadows, J. B. Holt, *Phys. Rev.*, 83, 1257 (1951).

[Mi78]

R. Michel, G. Brinkmann, H. Weigel, W. Herr, *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 40, 1845 (1978).

[Mi86]

R. Michel, P. Dragovitsch, P. Englert, F. Peiffer, R. Stück, S. Theis, F. Begemann, H. Weber, P. Signer, R. Wieler, D. Filges, P. Cloth, *Nucl. Instr. Meth. B16*, 61 (1986).

[Mi96]

R. Michel, I. Leya, L. Borges, *Nucl. Instr. Meth. B113*, 434 (1996).

[Mi97]

R. Michel, R. Bodemann, H. Busemann, R. Daunke, M. Glauris, H.-J. Lange, B. Klug, A. Krins, I. Leya, M. Lüpke, S. Neumann, H. Reinhardt, M. Schnatz-Büttgen, U. Herpers, Th. Schiekel, F. Sudbrock, B. Holmqvist, H. Condé, P. Malmborg, M. Suter, B. Dittrich-Hannen, P.-W. Kubik, H.-A. Synal, D. Filges, *Nucl. Instr. Meth.* B129, 153 (1997).

[Ra64]

G. V. S. Rayudu, *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 30, 1149 (1964).

[Re54]

H. L. Reynolds, A. Zucker, *Phys. Rev.*, 96, 1615 (1954).

[Re91]

R. C. Reedy, K. Marti, *The Sun in Time*, University of Arizona Press, p. 260 (1991).

[Sa72]

E. A. Samworth, E. K. Warburton, G. A. P. Engelbertink, *Phys. Rev. C5*, 138 (1972).

[Sc87]

R. J. Schneider, J. M. Sisterson, A. M. Koehler, J. Klein, R. Middleton, *Nucl. Instr. Meth. B29*, 271 (1987).

[Sc96]

M. Th. Schiekel, F. Sudbrock, U. Herpers, M. Gloris, I. Leya, R. Michel, H.-A. Synal, M. Suter, *Nucl. Instr. Meth. B113*, 484 (1996).

[Sh68]

D. W. Sheffey, I. R. Williams, C. B. Fulmer, *Phys. Rev.*, 172, 1094 (1968).

[Si97]

J. M. Sisterson, K. Kim, A. Beverding, P. A. J. Englert, M. Caffee, A. J. T. Jull, D. J. Donahue, L. McHargue, C. Castaneda, J. Vincent, R. C. Reedy, *Nucl. Instr. Meth.* B123, 324 (1997).

[Ta67]

S. Tanaka, K. Sakamoto, J. Takagi, *Nucl. Instr. Meth.*, 56, 319 (1967).

[Ta99]

I. Tanihata, *Phys. World*, 12, 22 (1999).

[Tr97]

R. Tramontano, *Dissertação de Mestrado submetida ao Instituto de Física da USP*, São Paulo, 1997.

[Tr99]

R. Tramontano, V. R. Vanin, *Appl. Radiat. Isot.*, 51, 323 (1999).

[Tu90]

J. K. Tuli, *Nuclear Wallet Cards*, Brookhaven National Laboratory, July 1990.

[Va98]

V. R. Vanin, P. Gouffon, O. Helene, *Tópicos Avançados em Tratamento Estatístico de Dados em Física Experimental*, publicação interna do LAL, IFUSP (1998).

[Ve93]

L. Venturini, V. R. Vanin, *Appl. Radiat. Isot.*, 44, 999 (1993).

**REFERÊNCIAS**

---

[Wa62]

J. T. Wallmark, S. M. Marcus, *Proc. IRE*, 50, 286 (1962).

[Wa76]

J.R. Walton, D. Heymann, A. Yaniv, D. Edgerley, M. W. Rowe, *J. Geophys. Res.*, 81, 5689 (1976).

[Zi79]

J. F. Ziegler, W. A. Lanford, *Science*, 206, 776 (1979).

[Zi85]

J. F. Ziegler, J. P. Biersack, U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Solids*, Volume 1, Pergamon Press, 1985.