

VARIAÇÃO ANGULAR DA RESPOSTA DO CR-39 PARA NÊUTRONS

E.C.Vilela, M.C.Khoury, G.S.Zahn
Comissão Nacional de Energia Nuclear
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Supervisão de Física Nuclear - São Paulo - SP

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito de um projeto que tem por objetivo o desenvolvimento de um dosímetro pessoal para nêutrons. Apresentamos aqui dados referentes à dependência angular do detector CR-39 irradiado com feixes monoenergéticos de nêutrons de energias: 0,144; 0,565; 1,2; 2,1; 5,3 e 15,1 MeV. Detectores CR-39 de 700, 1400 e 2100 μm foram estudados, visando a verificação da influência da espessura na resposta angular deste material.

INTRODUÇÃO

O material detector de traços nucleares, ou SSNTD (Solid State Nuclear Track Detectors), carbonato diglicol poli-alílico, comercialmente conhecido como CR-39, tem sido amplamente estudado em um projeto da Supervisão de Física Nuclear do IPEN-CNEN/SP, que tem por objetivo a aplicação deste material na montagem de um dosímetro pessoal para nêutrons.

Este estudo foi proposto a partir da observação da falta de monitoração deste tipo de radiação no nosso país e do constante aumento do número de pessoas potencialmente expostas que advêm, principalmente, do crescimento do emprego de fontes e de aceleradores de partículas na área de física médica.

Para atingir o objetivo acima mencionado, o estudo do tipo de revelação, verificação da resposta em energia, resposta em dose, linearidade de resposta e dependência angular do material, se tornam necessários. Neste trabalho apresentamos os resultados obtidos para as condições de revelação e para a variação angular, em função da energia dos nêutrons.

Devido à impossibilidade de obtenção de feixes monoenergéticos no Brasil, as medidas foram realizadas no instituto ENEA de Bologna (Itália). As irradiações com feixes monoenergéticos foram realizadas nos institutos PTB e GSF durante a intercomparação do Eurados/Cendos de 1992.

O princípio de funcionamento deste material como detector de nêutrons com energia maior que 100 keV, consiste no fato de que nêutrons ao incidirem nestes detectores interagem com os elementos constituintes do mesmo produzindo, assim, partículas carregadas em movimento. Estas partículas provocam danos denominados traços latentes, os quais após um tratamento químico adequado (revelação) apresentam dimensões que permitem a sua visualização em um microscópio óptico.

As partículas emergentes deste tipo de interação dependem dos constituintes do material detector e da energia do nêutron incidente. No CR-39, para nêutrons de energia até cerca de 10 MeV, as partículas emergentes, na sua maior parte, são prótons de recuo. Para energias maiores haverá, também, a fragmentação de núcleos de carbono e oxigênio, que são outros constituintes do CR-39.

A dependência angular dos SSNTD's nasce basicamente do processo de revelação do material, pois esta é dependente do ângulo formado entre o traço latente e a superfície do material. Este ângulo pode ser descrito a partir da seguinte relação⁽¹⁾:

$$\theta_c = \text{tg}(v_b/v_t) \quad (1),$$

onde θ_c é o ângulo crítico para a revelação de um traço latente, v_b é a velocidade de ataque total do material e v_t é a velocidade de ataque do material no interior do traço latente. Para o ataque eletroquímico esta dependência não é tão bem conhecida mas tem-se indicações experimentais de que esta seja menor do que aquela obtida com ataques químicos⁽²⁾.

Outro parâmetro que interfere na dependência angular dos SSNTD's é a espessura dos mesmos e a utilização de radiadores, uma vez que influem na produção de prótons de recuo (aumentam a espessura do material rico em hidrogênio)⁽³⁾.

MÉTODOS

Revelação dos Detectores. Visando a dosimetria de nêutrons, as dimensões dos traços obtidos, após a revelação do detector e a menor dependência energética são fatores de extrema importância uma vez que o primeiro pode aumentar a velocidade de análise dos dosímetros e o segundo garante a utilização destes em campos de irradiação não conhecidos.

Partindo deste pressuposto optamos pela utilização do processo de revelação conhecido como ataque eletroquímico. Este consiste em submergir o detector, que se deseja atacar, em solução apropriada (em geral para plásticos, como o CR-39, é utilizada uma solução alcalina), e conjuntamente submetê-lo à ação de um campo elétrico alternado⁽⁴⁾. Este processo permite que traços de dimensões reduzidas como aqueles deixados pela passagem de prótons de recuo no CR-39 sejam ampliados a dimensões da ordem de 0,1 mm^2 . Estas dimensões de traços são passíveis de serem lidas em sistemas automáticos.

Neste trabalho foi estudada também uma variante deste processo de revelação que consiste em realizar-se um pré ataque químico dos detectores antes de realizar o ataque eletroquímico. Este pré ataque químico consiste em se submergir o detector em solução alcalina sem, entretanto a ação do campo elétrico alternado. Este processo de revelação faz com que o pré ataque funcione como um redutor e estabilizador do "background" do material⁽⁵⁾.

Neste trabalho a influência de um ataque eletroquímico e da sua variante com pré ataque químico foram investigadas de modo a verificar-se a sua influência na dependência angular dos detectores.

Sistema de Ataque Eletroquímico Utilizado. O sistema utilizado para o ataque do CR-39 é composto de células especiais para este tipo de ataque acopladas a uma fonte de tensão alternada controlada por um microcomputador (HP-41CV), e uma estufa para controle da temperatura do ataque.

O sistema permite que um total de até 100 detectores sejam revelados simultaneamente. A área atacada em cada detector é de 177 mm².

Sistema de Leitura dos Detectores. A leitura dos detectores é efetuada utilizando um microscópio óptico (Wild 162050) dotado de uma telecâmara e conectado a um analisador de imagem de vídeo (Optomax V) produzido pela Analytical Measuring Systems Ltd.

O aumento do microscópio óptico é de 25x. Este foi adaptado de modo que a área do detector que deve ser lida seja iluminada lateralmente. Este tipo de iluminação permite a discriminação dos traços de eventuais depósitos de pó sobre a superfície do detector que será submetido à leitura.

Cada campo de leitura tem uma área de 12 mm² e para cada detector são contadas 6 áreas independentes.

Irradiações. As irradiações dos detectores CR-39 foram realizadas nos seguintes laboratórios:

- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB-Alemanha),
- GSF Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (GSF-Alemanha).

A tabela 1 mostra as energias dos feixes monoenergéticos com os quais os detectores foram irradiados, os modos de produção de tais feixes e os fatores de conversão fluência-dose equivalente utilizados para o cálculo das doses a que os detectores foram submetidos.

Tabela 1: Modo de produção dos feixes de nêutrons utilizados nas irradiações realizadas no PTB e GSF e os respectivos fatores de conversão fluência-dose equivalente (H*(10)).

Energia (MeV)	Modo de produção do feixe de nêutrons*	Fator de conversão fluência-dose equivalente (H*(10)) (pSv.cm ²) ⁽⁶⁾
0,144	Reação ⁷ Li(p,n) ⁷ Be EP=1,946 MeV	100
0,565	Reação ³ He ED=1,50 MeV	265
1,2	Reação ³ H(p,n) ³ He EP=2,08 MeV	345
5,3	Reação ² H(d,n) ³ He ED=2,3 MeV	416
15,1	Reação ³ H(d,n) ⁴ He ED=0,40 MeV	559
²⁵² Cf	Fissão espontânea	340

Os detectores foram fixados em um "phantom" PMMA de 30cmx30cmx15cm para as irradiações. As irradiações foram realizadas a 0, 30, 60 e 85° em relação ao feixe de nêutrons incidente. Os detectores foram irradiados com doses da ordem de 2 mSv.

Descrição das amostras irradiadas. O CR-39 foi fixado em suportes de cartolina com dimensões de 7,5cmx7,5cm coberto com uma camada de polietileno de espessura 125µm. Na figura 1 temos um esquema do suporte utilizado para as irradiações. Nas posições identificadas por CR-39 foram fixadas pilhas de três detectores. Esta montagem possibilitou o estudo da resposta do material em função da espessura do mesmo.

RESULTADOS E CONCLUSÕES

A variação angular do CR-39 é um dos principais problemas que este material apresenta para o seu emprego em dosimetria pessoal, por isso a importância de um estudo detalhado do mesmo.

Intrinsicamente a dependência angular é devida a duas causas, a existência do ângulo crítico para a incidência dos prótons de recuo que irão formar os traços latentes possíveis de serem revelados; e o fato de que nem todos os prótons gerados no volume do material detector chegarão ao volume que será revelado. Com os

dados apresentados nas tabelas 1 e 2 podemos verificar a influência dos dois processos na dependência angular dos detectores. A tabela 1 apresenta os resultados obtidos para as condições de revelação sem pré tratamento químico e a tabela 2 os dados obtidos com pré ataque.

Verificamos que a dependência angular diminui com o aumento da energia dos nêutrons incidentes. Isto ocorre porque os nêutrons ao incidirem no volume detector produzirão prótons de recuo que sairão preferencialmente na mesma direção de incidência do nêutron e com um alcance que poderá fazer com que ele escape do CR-39 sem produzir traços.

Das tabelas podemos verificar também que em relação à espessura, de um modo geral, a mais recomendável foi aquela de CR-39 de espessura 1400 µm. Isto porque esta espessura mostrou-se mais "bem comportada" para toda a faixa de energia investigada.

Em relação ao tipo de ataque observou-se que a revelação com pré ataque químico produziu efeitos de seleção em energia que são indesejáveis, como se pode verificar para as espessuras de 2100 µm. O processo, entretanto, aumentou a resposta para algumas energias como o caso de detectores de 1400 µm e energia de 144 keV.

Tabela 2: Resposta em termos de dose equivalente do CR-39 em função da energia, do ângulo de incidência do feixe de nêutrons e da espessura dos detectores. Dados obtidos para condições de ataque com pré ataque químico.

0°

Energia (MeV)	700 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	1400 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	2100 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)
0,144	344 ± 20	275 ± 7	355 ± 15
0,565	272 ± 11	378 ± 13	289 ± 7
1,2	237 ± 9	240 ± 8	271 ± 9
252Cf	163 ± 4	175 ± 8	190 ± 6
5,3	100 ± 6	121 ± 8	127 ± 6
15,1	107 ± 3	96 ± 7	118 ± 4

30°

Energia (MeV)	700 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	1400 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	2100 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)
0,144	287 ± 12	225 ± 10	310 ± 12
0,565	231 ± 14	282 ± 9	224 ± 10
1,2	218 ± 10	183 ± 10	237 ± 11
252Cf	158 ± 13	166 ± 10	206 ± 6
5,3	106 ± 8	122 ± 4	135 ± 8
15,1	74 ± 4	100 ± 5	108 ± 3

60°

Energia (MeV)	700 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	1400 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	2100 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)
0,144	78 ± 8	80 ± 8	117 ± 10
0,565	72 ± 3	88 ± 7	72 ± 3
1,2	104 ± 7	84 ± 6	148 ± 7
252Cf	92 ± 8	80 ± 6	117 ± 5
5,3	64 ± 6	65 ± 4	87 ± 5
15,1	80 ± 4	76 ± 4	71 ± 5

85°

Energia (MeV)	700 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	1400 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	2100 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)
0,144	-	66 ± 5	72 ± 17
0,565	60 ± 5	39 ± 9	61 ± 7
1,2	45 ± 5	41 ± 5	50 ± 5
252Cf	44 ± 6	54 ± 5	46 ± 6
5,3	58 ± 5	49 ± 6	64 ± 4
15,1	62 ± 4	65 ± 3	83 ± 3

* EP=Energia do próton incidente
ED=Energia do deuteron incidente

As figuras 2 e 3 comparam os dados obtidos sem pré ataque químico com aqueles obtidos por Pitt e outros⁽⁷⁾ para as energias dos nêutrons incidentes respectivamente 144 keV e 14,7 MeV. Verificamos que as curvas obtidas para energia de 144 keV apresentam comportamentos similares àquela encontrada por Pitt para radiadores espessos, enquanto aquelas obtidas para a energia de 15,1 MeV, que foi confrontada com aquela de 14,7 MeV de Pitt, se demonstra muito menos dependente do ângulo de incidência do feixe. Este fato foi mais acentuado para a espessura de 1400 µm

Tabela 3: Resposta em termos de dose equivalente do CR-39 em função da energia, do ângulo de incidência do feixe de nêutrons e da espessura dos detectores.

Dados obtidos para condições de ataque com pré ataque químico.

0°

Energia (MeV)	700 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	1400 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	2100 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)
0,144	274 ± 31	452 ± 34	
0,565	182 ± 19	322 ± 21	
1,2	201 ± 27	212 ± 27	199 ± 24
252Cf	229 ± 24	301 ± 25	195 ± 23
5,3	97 ± 21	84 ± 21	50 ± 23
15,1	115 ± 17	76 ± 18	132 ± 17

30°

Energia (MeV)	700 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	1400 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	2100 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)
0,144	235 ± 32	252 ± 32	-
0,565	308 ± 22	189 ± 20	-
1,2	208 ± 27	-	-
252Cf	120 ± 25	127 ± 23	123 ± 22
5,3	85 ± 21	56 ± 23	121 ± 22
15,1	74 ± 18	81 ± 16	112 ± 17

60°

Energia (MeV)	700 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	1400 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	2100 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)
0,144	388 ± 27	89 ± 27	-
0,565	180 ± 23	307 ± 22	-
1,2	111 ± 22	127 ± 22	105 ± 22
252Cf	74 ± 22	106 ± 25	98 ± 25
5,3	53 ± 24	58 ± 21	57 ± 23
15,1	73 ± 16	63 ± 16	64 ± 18

85°

Energia (MeV)	700 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	1400 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)	2100 µm Resposta em dose equivalente (cm ⁻² .mSv ⁻¹)
0,144	-	6 ± 29	-
0,565	31 ± 17	62 ± 17	-
1,2	53 ± 22	33 ± 22	45 ± 25
252Cf	6 ± 21	31 ± 21	15 ± 21
5,3	63 ± 21	31 ± 20	40 ± 23
15,1	63 ± 18	44 ± 16	59 ± 18

Com os dados aqui apresentados podemos concluir que para a utilização de dosímetros baseados em CR-39 plano seria interessante verificar a posição de trabalho do usuário de modo a se obter a direção preferencial de chegada da radiação até o mesmo e assim poder sugerir a melhor posição de utilização do dosímetro ou mesmo a possível utilização de mais de um dosímetro simultaneamente em posições diferentes pelo mesmo usuário.

Com este trabalho podemos ainda, a partir dos dados obtidos definir o grau de confiança da resposta em dose fornecida pelo dosímetro que se está projetando e talvez sugerir algum fator de correção com base no deslocamento do usuário durante as irradiações. Isto será feito em etapas posteriores.

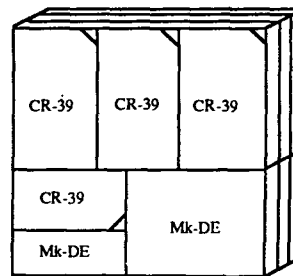


Figura 1: Esquema do suporte utilizado durante a irradiação dos detectores investigados neste trabalho. As posições onde foram fixados os detectores são denominadas por CR-39.

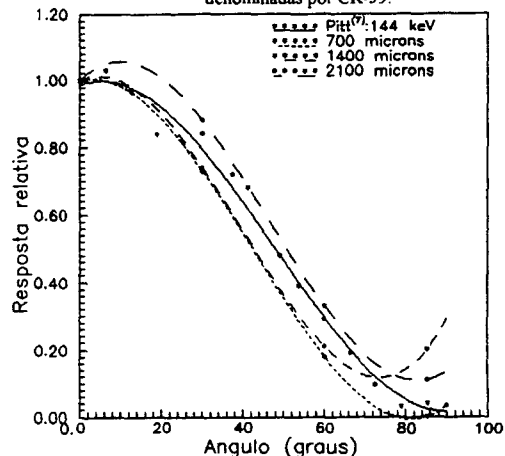


Figura 2: Resposta relativa do CR-39. Os valores obtidos foram normalizados àqueles com ângulo de incidência do feixe de nêutrons igual a 0° e energia 144 keV. As curvas apresentadas com linhas tracejadas foram aquelas obtidas neste trabalho e correspondem às espessuras 700, 1400 e 2100 µm, sem pré ataque químico.

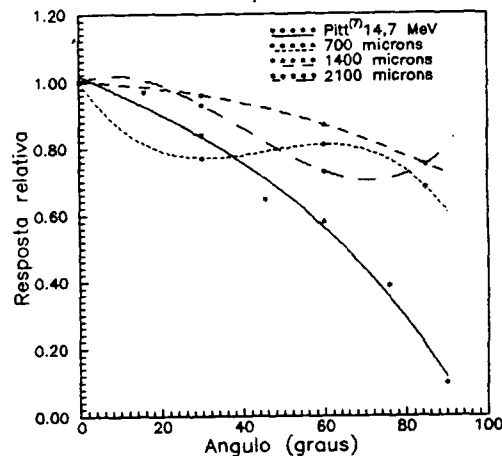


Figura 3: Resposta relativa do CR-39. Os valores obtidos foram normalizados àqueles com ângulo de incidência do feixe de nêutrons igual a 0° e energia 15 MeV. As curvas apresentadas com linhas tracejadas foram aquelas obtidas neste trabalho e correspondem às espessuras 700, 1400 e 2100 µm, sem pré ataque químico.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao instituto ENEA(BO)-Itália por tornar possível a realização das irradiações e de parte do desenvolvimento do trabalho, e ao CNPq pelo suporte financeiro do estudante de pós graduação E.C.Vilela durante a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Fleicher, R.L.; Price, P.B.; Walker, R.M.; Hubbard, E. L.

Criterion for registration in dielectric track detection
Phys.Rev., 156:353-5,1967.

- [2] Cross, W.G.; Arneja, A.; Ing, H. The response of electrochemically etched CR-39 to protons of 10 keV to 3 MeV **Nucl Tracks**, 12:649-52, 1986.
- [3] Cross, W.G.; Arneja, A.; Kim, J.L. The neutron energy and angular response of electrochemically etched CR-39 dosimeters **Radiat. Prot. Dosim.**, 20:49-55, 1987.
- [4] Tommasino, L.; Arnellini, C. A new etching technique for damage track detectors. **Rad. Eff.**, 20:253-5, 1973.
- [5] Hassib, G.M.; Piesch, E.K. electrochemical etching of neutron induced tracks in plastic detectors using a 50 Hz electric supply **Nucl. Instrum. Methods**, 154:377-81, 1979.
- [6] Wagner, S.R.; Grosswendt, B.; Harvey, J.R.; Mill, A.J.; Selbach, H.-J.; Siebert, B.R.L. Unified conversion functions for the new ICRU operational radiation protection quantities. **Radiat.Prot.Dosim.** 12(2):231-40, 1985.
- [7] Pitt, E.; Schaumann, A.; Werner, B. Electrochemical etching and angular dependence of CR-39 neutron detectors. In: **Proc. Fifth Symposium on neutron dosimetry** eds.H. Schraube, G.Berger and J. Booz EUR 9762 EU(Luxembourg:CEC) vol. 1 pp:501-10, 1985.

ABSTRACT

This work is part of a project of the Supervisão de Física Nuclear (IPEN/CNEN) that aims to develop a personal neutron dosimeter based on the SSNTD materials. Data concerning with the angular dependence of the CR-39 detector irradiated with monoenergetic neutron beams with energies between 0.144 and 15.1 MeV are presented herein. Detectors of thicknesses 700, 1400 and 2100 micra were studied for verifying the influence of this parameter on the material angular response.