

PC 735.137

COMISSÃO NACIONAL  
DE ENERGIA NUCLEAR



INSTITUTO DE  
ENGENHARIA NUCLEAR



RIO DE JANEIRO  
BRASIL

**DETECTORES SÓLIDOS  
DE  
TRAÇOS NUCLEARES**

*João Alfredo Medeiros*

*Maria Lúcia C. P. de Carvalho*

*IEN-44*

*/92*

*DEZEMBRO 1992*

---

**DETECTORES SÓLIDOS  
DE  
TRAÇOS NUCLEARES**

por  
**João Alfredo Medeiros**  
Supervisão de Apoio Químico - IEN  
e  
**Maria Lúcia C. P. de Carvalho - UFRJ**  
Departamento de Química Analítica - IQ - UFRJ

**IEN - Caixa Postal 68350  
Cidade Universitária - Ilha do Fundão  
CEP 21945-970 - Rio de Janeiro  
RJ - Brasil**

## **SOLID STATE NUCLEAR TRACK DETECTORES**

by

**João Alfredo Medeiros**

**Supervisão de Apoio Químico - IEN**

and

**Maria Lúcia C. P. de Carvalho - UFRJ**

**Departamento de Química Analítica - IQ - UFRJ**

### **ABSTRACT**

Solid state nuclear track detectors (SSNTD) are dielectric materials, crystalline or vitreous, which registers tracks of charged nuclear particles, like alpha particles or fission fragments. Chemical etching of the detectors origine tracks that are visible at the optical microscope: track etching rate is higher along the latent track, where damage due to the charged particle increase the chemical potential, and etching rate giving rise to holes, the "etched tracks". Fundamental principles are presented as well as some ideas of main applications.

**Keywords:** Solid State Nuclear track detectors, fission tracks, chemical etching.

**DETECTORES SÓLIDOS  
DE TRAÇOS NUCLEARES  
Princípios Gerais**

por

João Alfredo Medeiros  
Supervisão de Apoio Químico - IEN  
e  
Maria Lúcia C. P. de Carvalho - UFRJ  
Departamento de Química Analítica - IQ - UFRJ

**RESUMO**

Detectores sólidos de traços nucleares (DSTN) são materiais dielétricos, com estrutura cristalina ou amorfa, que registram traços de partículas nucleares carregadas, como partículas alfa ou fragmentos de fissão. A revelação química dos detectores dá origem a traços visíveis ao microscópio óptico convencional: a velocidade de ataque químico é maior ao longo do traço latente, onde os danos causados pela partícula carregada aumentaram o potencial químico, formando orifícios, os "traços revelados". Princípios fundamentais são apresentados, assim como uma idéia das principais aplicações.

Palavras-Chaves: Detectores sólidos de traços nucleares, traços de fissão, revelação química.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2. Formação de traços latentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Revelação química de traços</b>	<b>8</b>
<b>4. Aplicações e perspectivas</b>	<b>15</b>
<b>5. Bibliografia</b>	<b>19</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	

## Lista de Figuras

- Figura 1: Fotografias de traços de fissão de  $^{235}\text{U}$  em mica sintética (microscópio eletrônico) A) Sem revelação química B) Com revelação química (Ref. 8)
- Figura 2: Fotografias de traços de fissão de  $^{252}\text{Cf}$  em: A) Mica B) Quartzo vítreo C) Vidro D) Makrofol e E) Lexan (Visitas ao microscópio óptico) (Ref. 9)
- Figura 3: Perda de energia de uma partícula ( $dE/dx$ ) x distância percorrida (cm) no ar, "curva de Bragg" (Ref. 11)
- Figura 4: Distribuição de massa de fragmentos de fissão de  $^{235}\text{U}$  por nêutrons térmicos e de 14MeV (Ref. 10)
- Figura 5: Distribuição de energia cinética dos fragmentos de fissão de  $^{235}\text{U}$  por nêutrons térmicos (Ref. 11)
- Figura 6: Taxa de perda de energia de fragmentos de fissão de diferentes massas em policarbonato (Ref. 38)
- Figura 7: Modelo para formação de um traço latente de fragmento de fissão: A) em cristal iônico B) em polímero orgânico
- Figura 8: Modelo para a geometria de revelação de traços de fissão com diferentes ângulos de incidência
- Figura 9: Desenvolvimento do traço de fissão ao longo da revelação, sob  $v_c$  constante, para diferentes  $dE/dx$
- Figura 10: Conceito de ângulo crítico para revelação
- Figura 11: Relação entre ângulo crítico ( $\psi_c$ ) e eficiência de revelação para fragmentos de fissão.

## Lista de Tabelas

- 1 - Principais detectores em uso para registrar partículas e fragmentos de fissão (ff).



## 1. Introdução

Partículas nucleares carregadas, principalmente fragmentos de fissão e partículas alfa, altamente ionizantes, formam um rastro de perturbações estruturais, atômicas e moleculares ao penetrarem sólidos dielétricos, tais como polímeros orgânicos, vidros ou cristais. Estes traços nucleares foram observados e caracterizados pela primeira vez em 1958 por Young (1) e em 1959 por Silk e Barnes (2). Tratavam-se de traços de fragmentos de fissão de urânio em cristais de LiF e de mica (moscovita), que foram fotografados com o auxílio de um microscópio eletrônico. Estes traços correspondem a regiões quase cilíndricas de 10 a 100 Å de diâmetro e de 10 a 50 µm de comprimento.

De acordo com idéias de Young (1) estes traços nucleares poderiam ser revelados por ataque químico, pois o potencial químico do material ao longo de um traço seria mais elevado. Seguindo esta linha, Price e Walker, em 1962 descobriram como revelar quimicamente traços de fissão em mica e em outros materiais permitindo a observação dos traços revelados com o auxílio de um microscópio óptico convencional (3-6). Esta descoberta deu grande impulso no estudo de detectores sólidos de traços nucleares (DSTN) para o registro de diversas partículas nucleares, abrindo um campo novo de investigação científica e de aplicação em diversas áreas de conhecimento: química, física e geociências, principalmente. Os maiores responsáveis pelo desenvolvimento de estudos e aplicações de DSTN foram P.B.Price, R.M.Walker e R.L.Fleischer, nos laboratórios da General Electric Co., EUA. Importante revisão de trabalhos foi publicada já em 1965 (7) e é clássica a obra "Nuclear Tracks in Solids" onde trabalhos experimentais, modelos e aplicações são apresentados (8).

Hoje são conhecidos DSTN das mais variadas composições: naturais, como mica, quartzo, apatita, berilo, ou sintéticos como quartzo cristalino ou vítreo, vidros de diversas composições e polímeros orgânicos (nitrato de celulose, acetado de celulose, policarbonatos, etc..)

A figura 1 mostra traços de fissão de urânio em mica, sem tratamento químico e revelados com HF (8). Pela revelação química os traços latentes são atacados mais rapidamente do que a superfície original do detector e são transformados em orifícios, cuja forma depende principalmente da estrutura do detector. A figura 2 mostra traços de fissão de  $^{252}\text{Cf}$  revelados em diversos detectores (9). A forma de prismas romboédricos dos traços revelados em mica é devida à estrutura cristalina hexagonal deste mineral, e à anisotropia dela decorrente, com simetria di-trigonal.

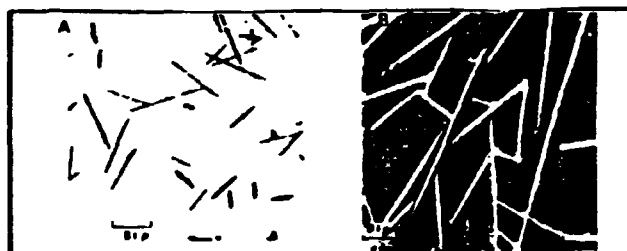


Figura 1. Fotografias de traços de fissão de  $^{235}\text{U}$  em mica sintética (microscópio eletrônico) A) Sem revelação química B) Com revelação química (ref 8)



Figura 2. Fotografias de traços de fissão de  $^{252}\text{Cf}$  em: A) mica B) quartzo vítreo C) vidro D) Makrofol e E) Lexan (vistos ao microscópio óptico) (Ref. 9)

## 2. Formação de traços latentes

São denominados traços latentes os rastros de danos causados em sólidos dielétricos por partículas ionizantes. O volume de um traço latente é mínimo e a energia nele dissipada por uma partícula  $\alpha$  (alguns Mev) e principalmente por um fragmento de fissão (70 - 120 Mev) gera altas doses absorvidas. Como pode ser visto na figura 3, a curva de dissipação de energia de partículas alfa (curva de Bragg), relacionando  $dE/dx$ , a perda de energia por unidade de comprimento ao longo do percurso "x", mostra um aumento da interação da partícula  $\alpha$  com o meio ao longo de seu percurso, e uma diminuição brusca no final, quando a partícula alcança o repouso. Desta forma o traço latente de uma partícula  $\alpha$  é mais intenso próximo de sua extremidade.

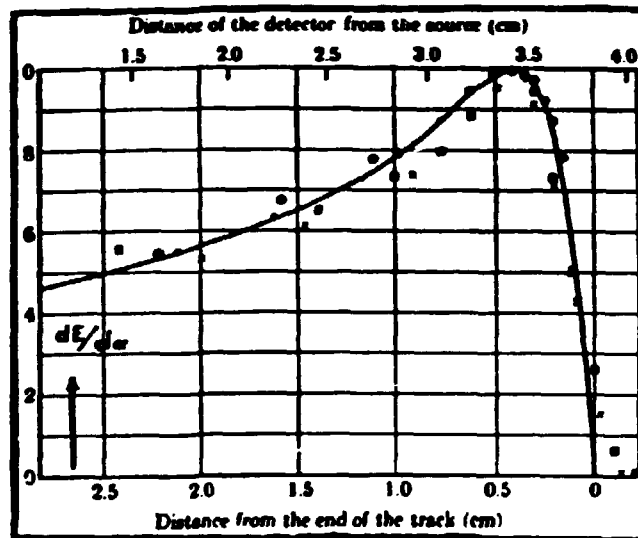


Figura 3. Perda de energia de uma partícula  $\alpha$  ( $dE/dx$ ) x distância percorrida (cm) no ar, "curva de Bragg" (Ref. 11)

Na fissão de núcleos de actínídeos, espontânea ou induzida por nêutrons, predomina a formação de fragmentos desiguais (fissão simétrica), especialmente se a fissão não for provocada por partícula de alta energia. Quase toda a energia liberada na fissão (~ 85%) é carregada como energia cinética pelos fragmentos de fissão. Esta energia se distribui de acordo com o princípio da conservação da quantidade de movimento, de forma que o fragmento de menor massa tem maior energia cinética.

A figura 4 mostra uma curva de distribuição de massa dos fragmentos de fissão de  $^{235}\text{U}$  por nêutrons térmicos e por nêutrons rápidos de 14 Mev. A figura 5 mostra a distribuição de energia cinética dos fragmentos de fissão de  $^{235}\text{U}$ .

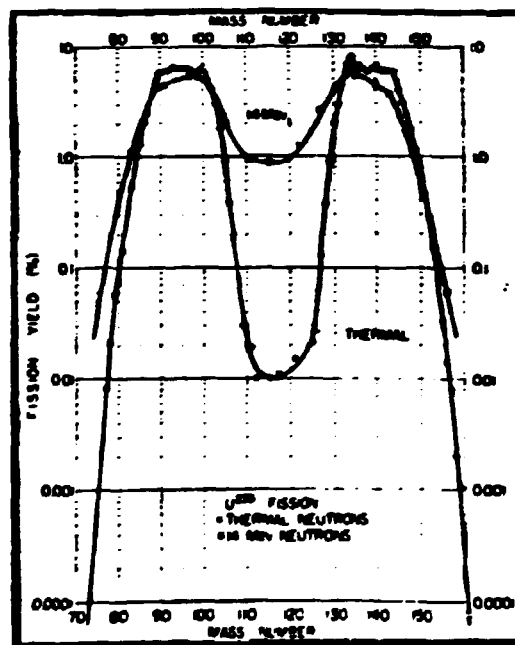


Figura 4. Distribuição de massa de fragmentos de fissão de  $^{235}\text{U}$  por nêutrons térmicos e de 14 Mev (Ref. 10).

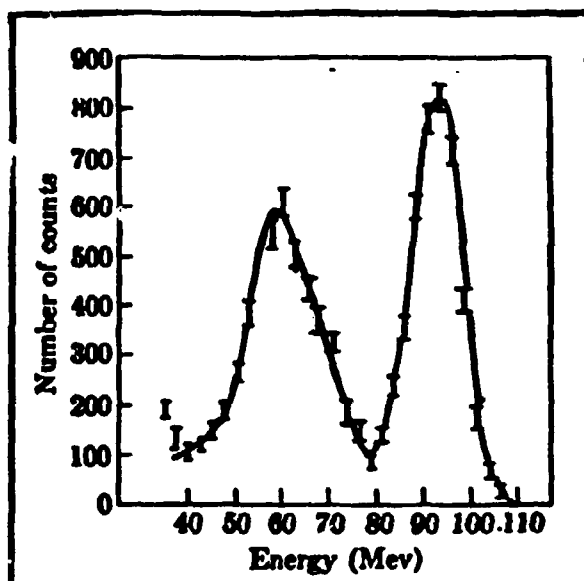


Figura 5. Distribuição de energia cinética dos fragmentos de fissão de  $^{235}\text{U}$  por nêutrons térmicos (Ref. 11).

Como pode ser observado, predominam fragmentos de fissão com  $\sim 60$  e  $\sim 95$  Mev, que correspondem aos números de massa  $\sim 140$  e  $\sim 95$ , respectivamente. Os fragmentos de fissão têm, inicialmente, carga iônicas muito elevadas ( $\sim 20+$ ) e interagem fortemente com o meio em que penetram, dissipando sua energia cinética até alcançarem o repouso e a eletroneutralidade. Ao contrário das partículas  $\alpha$ , os fragmentos de fissão apresentam  $dE/dx$  elevado ao penetram em um sólido, como pode ser observado na figura 6.

Considerando o alcance de  $18 \mu\text{m}$ , típico de fragmentos de fissão de 100 Mev em um detector orgânico, com peso específico  $1,2 \text{ g/cm}^3$ , e o diâmetro de um traço latente de  $50 \text{ \AA}$  (varia segundo a literatura de 10 a  $100 \text{ \AA}$ ) pode ser calculada a dose absorvida:

$$\text{Dose} \left[ \frac{\text{erg}}{\text{g}} \right] = \frac{10^8 \text{ e V} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ ergs/e V}}{1,8 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \pi \cdot (2,5 \cdot 10^{-7})^2 \text{ cm}^2 \cdot 1,2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}}$$

$$\text{Dose} = 3,77 \cdot 10^{11} \text{ erg/g}$$

$$\text{Dose} = 3,77 \cdot 10^9 \text{ Rad} = 3,77 \cdot 10^7 \text{ Grays.}$$

Esta elevada dose absorvida dá uma idéia macroscó  
pica da perturbação que o detector pode sofrer ao longo do traço  
latente. Considerando que todos os bons detectores de traços de  
fissão são maus condutores de calor e eletricidade, esta deposi  
ção de energia pode causar modificações físicas e químicas ao long  
o de traço e provavelmente a fusão momentânea do material.

Do ponto de vista microscópico, é interessante compar  
ar a energia de um fragmento de fissão de 100 Mev com as ener  
gias típicas de ligação em substâncias diversas, da ordem de al  
guns eV, muito milhões de vezes inferior. Há quem compare numeri  
camente a energia dissipada por um fragmento de fissão no traço  
latente à energia termo-nuclear. Esta é a causa da completa desor  
dem estrutural em que se encontrará o detector no final da rea  
ção. Se o detector for um cristal, os átomos poderão entrar em po  
sições intersticiais, poderão ser criadas vacâncias ou apenas des  
locamentos dos átomos. Em um material orgânico (plástico) poderão  
 ser geradas novas espécies químicas, novos íons ou radicais livres.

De modo geral são aceitos os modelos de formação de traços de la  
tentes com base em ionização primária e secundária (explosão iô  
nica) para vidros e cristais e modelos de ruptura e formação de  
 novas ligações e formações de moléculas menores para polímeros  
 orgânicos. Estes dois processos são ilustrados na figura 7.

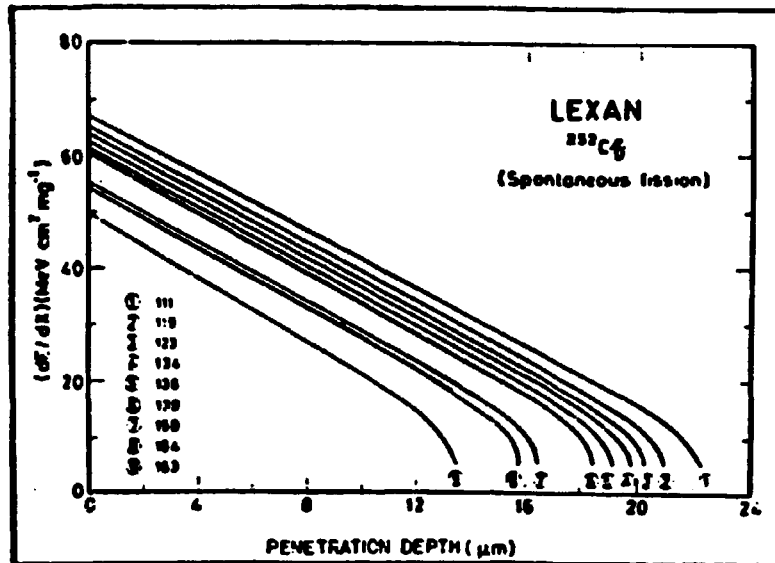


Figura 6. Taxa de perda de energia de fragmentos de fissão de diferentes massas em policarbonato (Ref. 38).

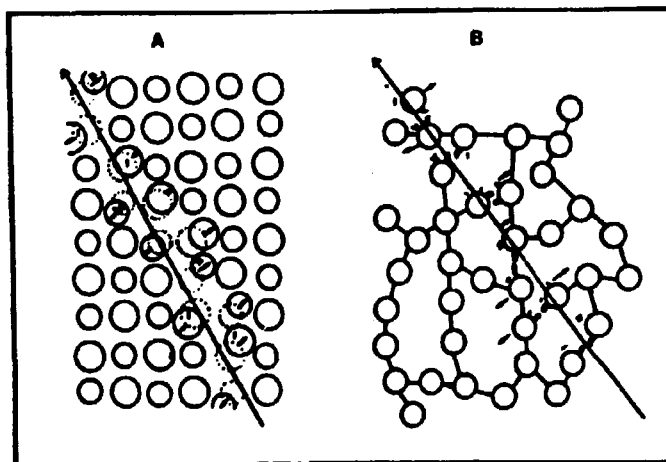


Figura 7. Modelo para formação de uma traço latente de fragmento de fissão: A) em cristal iônico B) em polímero orgânico.

### 3. Revelação química de traços

A revelação química de traços latentes é um processo simples, em que o detector é imerso em um reagente químico adequado, que ataca lentamente a superfície não alterada do detector, e mais rapidamente o traço latente. O potencial químico ao longo do traço latente é maior do que no material original, e depende de  $dE/dx$ . Quanto maior  $dE/dx$  mais intenso é o traço latente e mais facilmente será revelado.

O reagente difunde-se através da região danificada, atacando-a, dissolvendo-a e removendo material. Simultaneamente o corpo do material também é atacado, mas com menor velocidade.

A cinética da revelação química envolve a relação entre a velocidade de ataque da superfície do detector ( $v_g$ ) e a velocidade de ataque ao longo do traço latente ( $v_t$ ).

Se o detector for isotrópico,  $v_g$  não varia com a orientação espacial. A figura 8 ilustra a revelação química de dois traços latentes em um detector isotrópico, para  $v_t / v_g = 10$ . O traço A é perpendicular à superfície do detector e um modelo geométrico simples ilustra a evolução do traço revelado. O desenho representa um corte da superfície do detector e P o ponto de incidência da partícula. A linha pontilhada indica a superfície original. Após um tempo  $t$  de ataque foi removida da superfície a camada de espessura  $v_g \cdot t$ , enquanto que ao longo do traço latente foi formado um orifício com profundidade  $v_t \cdot t$ .

A forma resultante é a de um cone, consequência da variação do vetor que representa a espessura dissolvida desde o valor  $v_g \cdot t$  em direções paralelas à superfície, a partir de P até  $v_t \cdot t$  na direção do traço latente, perpendicular à superfície no traço A. Na parte superior do desenho é feito um rebatimento, indicando a projeção do traço na superfície do detector, forma que



é observada no microscópio, quando as dimensões do traço revelado superam o comprimento de onda da luz visível.

A partir do ponto P, de incidência, pode ser traçado o triângulo retângulo cujos catetos são  $v_g \cdot t$  e  $v_t \cdot t$ , cuja rotação ao longo do traço latente gera a superfície cônica do traço revelado, com ângulo de cone  $\theta$ .

$$\operatorname{tg} \theta = v_g \cdot t / v_t \cdot t = v_g / v_t$$

Para ângulos agudos,  $\operatorname{tg} \theta \cong \operatorname{sen} \theta$  e surge a relação  $\operatorname{sen} \theta \cong v_g / v_t$  (Eq. 1), que define a geometria de formação de traços revelados em meios isotrópicos para intervalos em que  $v_t$  é constante. Em traços perpendiculares à superfície do detector, a intersecção do cone com a superfície revelada é uma circunferência com raio  $r \cong v_g \cdot t$ ; a projeção do traço, como é vista ao microscópio é um círculo com  $D \cong 2 \cdot v_g \cdot t$ ; o comprimento do traço revelado é a altura do cone,  $L = (v_t - v_g) \cdot t$ . Em traços inclinados a intersecção da superfície cônica com a superfície revelada é uma elipse, e o traço revelado projetado, como é observado ao microscópio, tem a forma do traço B, na figura 8.

Os termos que definem a revelação química,  $v_g$  e  $v_t$ , dependem da perda da energia da partícula que formou o traço latente. A taxa de deposição de energia  $dE/dx$ , que mede a intensidade dos danos sofridos pelo detector, diminui ao longo do traço latente até a dissipação completa da energia da partícula. Como  $v_t$  é função dos danos causados será também função de  $dE/dx$ . A variação de  $dE/dx$  ao longo do trajeto pode ser calculada de acordo com modelos conhecidos. O ângulo de abertura do cone depende da razão  $dE/dx$ . A medida que aumenta  $v_g / v_t$ , o ângulo do cone aumenta, como pode ser visto na figura 9. Em (a)  $v_g / v_t$  é maior do que em (b), onde o ângulo do cone é mais agudo. Se  $v_t$  for muito maior do que  $v_g$  ( $dE/dx$  muito elevada ao longo do traço e com pequena variação) o ângulo do cone é tão pequeno, que a abertura do traço não parece cônica, aproxima-se de um cilindro, como é representado em (c). Isto pode ser observado nas fotografias de traços de fissão

reveladas em diversos detectores, mostradas na figura 2, especialmente em vidro, quartzo vitreo e "Makrofol", seguindo a ordem crescente de  $v_t / v_g$ .

Para cada detector, sob determinadas condições de revelação química, há um valor crítico de  $dE/dx$  para cada partícula nuclear para que esta possa ser registrada e revelada quimicamente:  $(dE/dx)$  crítico. Acima deste valor a razão  $v_t / v_g$  é suficiente para que um traço visível possa ser revelado.

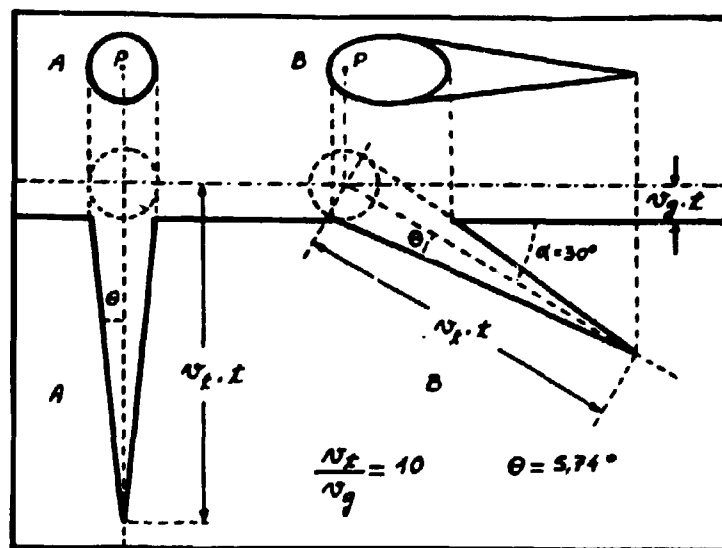


Figura 8. Modelo para a geometria de revelação de traços de fissão com diferentes ângulos de incidência.

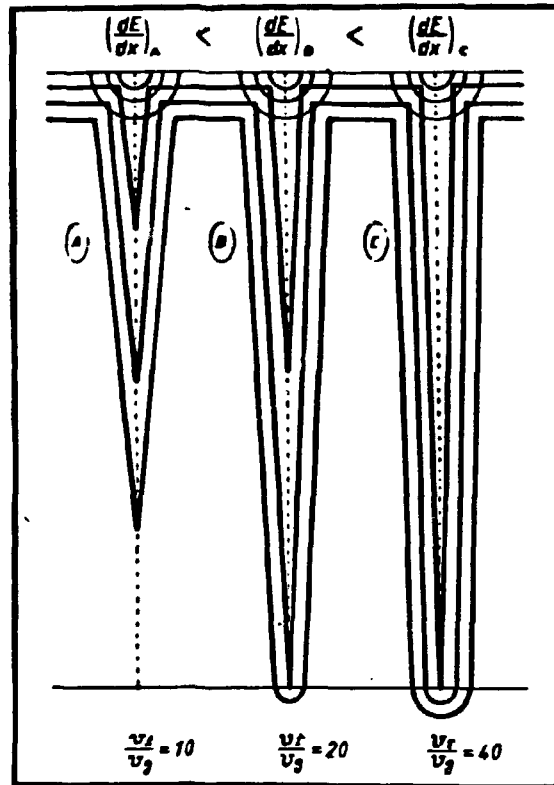


Figura 9. Desenvolvimento do traço de fissão ao longo da revelação, sob  $v_t$  constante, para diferentes  $dE/dx$ .

### Ângulo crítico

Uma fração dos traços que atingem o detector não é registrada, porque é o ângulo de incidência desses traços é muito pequeno. A figura 10 mostra o corte transversal de um detector com três traços em ângulos de incidência diferentes (a, b, c) antes e depois da revelação química. O traço "a", com maior ângulo de incidência, "b" e "c", contidos na camada removida, não são revelados. Para que um traço seja revelado, é necessário que a componente vertical do vetor  $v_t \cdot t$  seja maior do que o vetor  $v_g \cdot t$ , que corresponde à espessura da camada removida. Surge daí a condição de ângulo crítico para a revelação de um traço latente:

$$\frac{v_t \cdot t \cdot \sin \alpha}{c} = \frac{v_g \cdot t}{g} \text{ ou } \sin \alpha = \frac{v_g}{v_t} \quad (\text{Eq. 2})$$

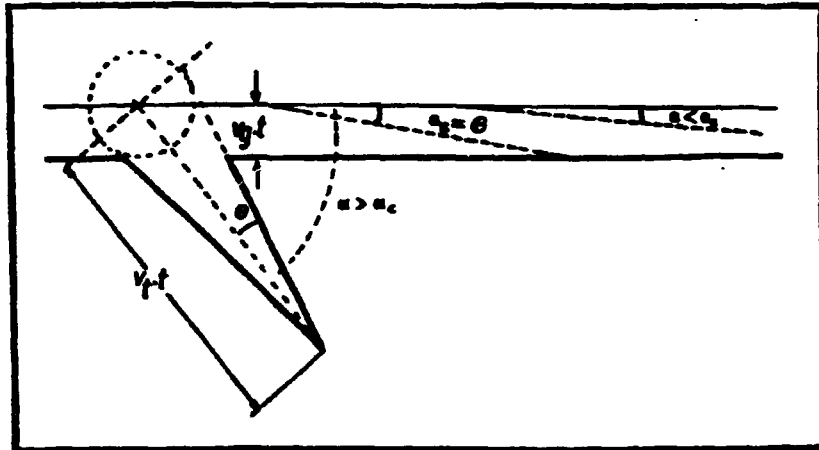


Figura 10. Conceito de ângulo crítico para revelação.

Para pequenos ângulos os valores do seno e da tangente são praticamente iguais.

Comparando as equações 1 e 2 conclui-se que o ângulo crítico,  $\alpha_c$ , corresponde ao ângulo de abertura do cone,  $\theta$ , para detectores isotrópicos revelados até a extensão em que  $v_t$  se mantém praticamente constante. O ângulo crítico depende da razão  $v_t / v_g$ , e, portanto de  $dE/dx$ , e não pode ser considerado característica do detector somente, pois é função também da cinética de revelação química. Quanto maior a energia inicial da partícula menor o ângulo crítico.

#### Eficiência de um detector ( $\epsilon$ )

Se um detector for submetido a incidência de partículas vindas de todas as direções, somente serão reveladas aquelas cujos ângulos de incidência forem maiores que o ângulo crítico.  $\epsilon = n^\circ$  de traços revelados /  $n^\circ$  total de traços.

A figura 11 ilustra as frações de traços reveláveis e não reveláveis de um detector. Considere-se uma fonte de partículas nucleares, fragmentos de fissão, por exemplo, situada na superfície de um detector. As partículas emitidas de cada ponto P se distribuem aleatoriamente em qualquer direção. Em um corte do detector, as partículas com ângulos de incidência menores do que o ângulo crítico atravessam o arco BC. Para pequenos ângulos  $\overline{BC} \approx R \text{ sen } \alpha$ .

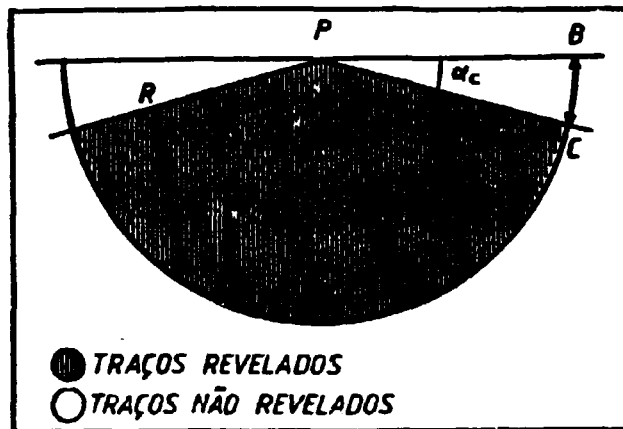


Figura 11. Relação entre ângulo crítico ( $\alpha_c$ ) e eficiência de revelação para fragmentos de fissão.

considerando a geometria  $2\pi$ , o número de partículas não reveláveis  $N$  será proporcional à superfície esférica correspondente no arco  $BC$ , enquanto que o número total de partículas  $T$  será proporcional à superfície da semi-esfera.

$$\frac{N}{T} = \frac{2\pi R \cdot R \cdot \text{sen } \alpha_c}{2\pi R^2} = \text{sen } \alpha_c, \text{ e } \epsilon_{\text{ext}} = 1 - \text{sen } \alpha_c$$

(Eq. 3)

O cálculo da eficiência para a revelação de traços provenientes do interior do detector, como ocorre em materiais naturais contendo urânio deve levar em conta que todos os fragmentos não partem da mesma superfície, mas de um volume variado. Segundo Fleischer (8)

$$\epsilon_{\text{int}} = \cos^2 \alpha_c \quad \text{(Eq. 4)}$$

Todos os parâmetros importantes na revelação química de traços nucleares em sólidos, como  $v_g$ ,  $v_t$ ,  $(dE/dx)$  crítico,  $\alpha_c$ ,  $\epsilon$  dependem, além das características físico-químicas de detectores, da espécie e da energia da partícula carregada, bem como do agente químico usado na revelação. Por exemplo, para os fragmentos de fissão de maior energia são maiores  $v_t$ , a razão  $v_t / v_g$ ; os ângulos de cone  $\theta_c$  (e os ângulos críticos  $\alpha_c$ ) são menores, e a eficiência  $\epsilon$  é maior do que os valores correspondentes para os fragmentos de menor energia. Para fragmentos de fissão são utilizados em geral parâmetros médios, obtidos estatisticamente a partir de medidas feitas para um número grande de fragmentos formados na fissão de urânio ou provenientes da fissão espontânea de  $^{252}\text{Cf}$ .

A título de ilustração a tabela 1 apresenta alguns detectores para partículas  $\alpha$  e para fragmentos de fissão com as respectivas condições de revelação química, ângulo crítico e eficiência de registro e revelação química.

Tabela 1.1

Principais detectores em uso para registrar partículas  $\alpha$  e fragmentos de fissão (ff)

Detector	Partículas	Revelação	$\alpha_c$	$\epsilon$	(Ref.)
Nitrato de celulose	.	NaOH 2,5M 18°, 20h	$\sim 2^\circ$	0,98 $\pm$ 1	(20)
	$\alpha$	NaOH 6M 50°, 2-4h			(16)
	ff	NaOH 6,25M 55°, 4min	2°30'		(17)
Acetato de celulose	$\alpha$	NaOH 2,5M 60°, 10-30min			(37)
	ff	NaOH 6,5M 40°, 1h			(13)
CR - 39 ( polímero/dietilenoglicol bis-alil carbonato )	$\alpha$	NaOH 6,25M 75°, 6h			(20)
	ff	NaOH 6M 60°, 1h	$\sim 1^\circ$	0,98	(22)
Policarbonato do "bis-fenol A": "Lexan" (GE) (L) "Makrofol"/"Makrolon" (Bayer) (M)	$\alpha$	NaOH 6,25M	3°	0,95(M)	(17)
	ff	NaOH 6M 60°, 20min	10	0,98(L)	(a)
Quartzo Vítreo	ff	HF 10% 30°, 25min	11°	0,81	(18, 15)
		HF 5% 60°, 21min			(19)
Quartzo Cristalino	ff	HF 40% 21°, 2h	7°30'	0,87	(17)
		NaOH 150°, 3h			(8)
Vidro Alcalino	ff	HF 10%			(16)
		HF 40% 21°, 1min	35°30'	0,42	(12)
Mica Biotita $K(Mg, Fe) AlSi_3O_{10}(OH)_2$ Moscovita $K Al_3Si_3O_{10}(OH)_2$	ff	HF 20% 23°, 1-2min			(13)
		HF 39-43% 21°, 120min	4°30'	0,92	(17)
Quartzo natural/Obsidiana (SiO <sub>2</sub> amorfo)	ff	HF 39-43% 21°, 60Seg	26°	0,57	(17)

#### 4. Aplicações e perspectivas

A partir da descoberta da revelação química de traços, inúmeras aplicações de DSTN têm surgido em diversos campos da ciência e da tecnologia. A revelação de traços latentes de diversas espécies de partículas carregadas (prótons, alfas, íons pesados, acelerados, fragmentos de fissão) pode fornecer muitas informações. O número de partículas é obtido diretamente a partir da contagem do número de traços, e da eficiência de revelação. Controle adequado da revelação permite discriminar espécies de partículas, e medidas de parâmetros de traços (diâmetro e profundidade) permitem determinar energias das partículas. Mapeamento ou distribuição dos traços na superfície do detector que estava em contacto com uma amostra permite mapear elementos em amostras sólidas.

As aplicações de DSTN podem ser agrupadas de acordo com os campos de atividade. Estudos de Física de Partículas, de origem cósmica, natural ou de aceleradores, utilizam DSTN para medidas de fluxo, controle de colimação, determinação e atenuação de energia de partículas carregadas.

Medidas de fluxo de nêutrons podem ser feitas revelando traços de recuo em plásticos ( 23 ) ou combinando folhas contendo material fissionável (U , Th) com um detector de traços de fissão (o número de traços de fissão por área é proporcional ao fluxo de nêutrons). Para nêutrons térmicos são usadas folhas metálicas contendo urânio (24,25 ) e para nêutrons rápidos, ligas contendo tório, que só fissiona com nêutrons de energia superior a ~ 1 Mev.

Nas Geociências merecem destaque o uso de detectores plásticos sensíveis a partículas alfa em trabalhos de prospecção de urânio a partir da emissão de radônio ( 26 ). O mapeamento, ou distribuição espacial de emissores alfa em seções polidas de rochas, é feito colocando estas em contacto com uma folha de nitrato de celulose, por exemplo. Após um tempo de exposição, que depende da concentração (ou atividade) dos emissores alfa



presentes, o detector é revelado quimicamente. Macro ou micro fotografias, ou mesmo a superposição de detector e amostra permite localizar as inclusões contendo emissores alfa ( 14 ). Urânio pode ser mapeado irradiando um detector de fragmentos de fissão, em contacto com a amostra, com nêutrons térmicos e revelando posteriormente o detector. Métodos de datação de rochas e vidros utilizam DSTN ( 27 ). A medida do número de traços de fissão espontânea de urânio ( $^{238}\text{U}$ ) acumulados ao longo da vida da amostra, e do número de traços produzidos por fissão induzida de  $^{235}\text{U}$  com nêutrons térmicos, permite calcular a idade da amostra, conhecida a constante de decaimento do  $^{238}\text{U}$ , por fissão espontânea e a abundância isotópica.

Em estudos de radiometria e de controle ocupacional ou ambiental diversos DSTN são usados para medir exposição a prótons, alfas, nêutrons, e o acúmulo de emissores alfa em tecidos biológicos. Filtros de ar na indústria de urânio são analisados a partir das partículas alfa emitidas ( 28 ).

Na Química Analítica DSTN são usados principalmente para a determinação de urânio ( 24,25 ) e tório ( 24 ) utilizando traços de fissão induzida por nêutrons de reator. O método é altamente específico para urânio em irradiação com nêutrons térmicos, pois não há outro elemento natural que sofra fissão nestas condições. A combinação de separação química de urânio nas amostras com irradiação com nêutrons rápidos ou fluxo misto ("nêutrons de reator") permite determinar tório ( 24 ). Podem ser analisadas amostras de qualquer natureza e com ampla faixa de concentrações, desde águas naturais ( 24 ), ou material biológico ( 28,29 ) até minérios ou ligas metálicas ( 24,25 ).

Alguns outros elementos também podem ser determinados através de reações de fissão, como plutônio ou outros actídeos ( 30 ). Pesquisa de elementos super-pesados têm se utilizado de DSTN para a detecção final, pois a combinação de separações químicas e determinação de número de massa com medidas de fissão induzida permitiriam a caracterização de tais transactídeos, ( 18 ).

Além dos nuclídeos fissionáveis, alguns outros elementos podem ser determinados utilizando reações ( $n, \alpha$ ), tais como B, Li, Bi, (31-33) ou ( $^3\text{He}, \alpha$ ) tal como Pb (34).

Algumas aplicações tecnológicas tem-se utilizado de DSTN. Filtros de membranas com poros de diâmetros controlados são fabricados bombardeando filmes plásticos com íons acelerados ou produtos de fissão (35). Filtros de mica são fabricados com espessura e diâmetro dos poros controlados para a separação de  $^{220}\text{Rn}$  de  $^{222}\text{Rn}$  para trabalhos de prospecção.  $^{220}\text{Rn}$ , de meia vida curta, decai durante a difusão. (36).

Levando em conta que o campo é relativamente recente, com menos de 25 anos de atividades, o desenvolvimento de DSTN tem sido considerável, e as perspectivas ainda são muito boas de descobertas de novas aplicações e ampla utilização em diversos campos da ciência. As instalações necessárias são simples, apenas um laboratório químico normal, um microscópio óptico e utilização dos serviços de irradiação de um reator de pesquisas, disponível no IPEN/CNEN - São Paulo e no CDTN/Nuclebrás-Belo Horizonte.

## Bibliografia

- 1) D.A. Young: Nature 182, 375 (1958).
- 2) E.C.H. Silk, R.S. Barnes: Phil. Mag. 4, 970 (1959).
- 3) R.M. Walker, P.B. Price: Bull. An. Phys. Soc. 7, 52 (1962).
- 4) P.B. Price, R.M. Walker: Nature 196, 732 (1962).
- 5) P.B. Price, R.M. Walker: J. Appl. Phys. 8, 217 (1962).
- 6) P.B. Price, R.M. Walker: Phys. Lett. 3, 113 (1962).
- 7) R.L. Fleischer, P.B. Price, R.M. Walker: Ann. Rev. Nucl. Sci. 15, 1 (1965).
- 8) R.L. Fleischer, P.B. Price, R.M. Walker: "Nuclear Tracks in Solids" Univ. California Press (1975).
- 9) M.L.C.P. de Carvalho: "Efeitos de Irradiação nas Propriedades de Policarbonatos como Detectores de Traços de Fissão Induzida em Reator". Dissertação de Mestrado, PUC/RJ (1984).
- 10) E.K. Hyde: "A Review of Nuclear Fission-Part. I-Fission Phenomena at Low Energy" UCPL - 9036 (1962).
- 11) I. Kaplan: "Nuclear Physics" Addison - Wesley Publ. Co. Massachusetts - California 2<sup>nd</sup> Ed. (1977).
- 12) H.A. Khan: Nucl. Instr. Meth. 173, 43-54 (1980).
- 13) M.M. Monnin: Nucl. Instr. Meth. 173, 1-14 (1980).
- 14) C.M. Bouch: "Mapeamento de Urânio, Tório e Emissores  $\alpha$  Utilizando Detectores Sólidos de Traços Nucleares". Dissertação de Mestrado, PUC/RJ (1982)
- 15) O.M.G. Moraes: "Efeitos de Irradiação em Quartzo Vítreo SUPRA - SIL como Detector de Traços de Fissão Induzida em Reator sob Altos Fluxos de Nêutrons". Tese de Doutorado, PUC/RJ (1984).
- 16) A.M.M. Amorim: "Vidros Alcalinos como Detectores de Traços de Fissão Induzida em Reator". Tese de Doutorado, PUC/RJ (1986).
- 17) H.A. Khan, S.A. Durrani: Nucl. Instr. Meth. 98, 229-236 (1972).
- 18) João A. Medeiros: "Suche Nach Ueberschweren Elementen in der Natur mit Verbesserter Nachweisempfindlichkeit". Tese de Doutorado, Univ. Duisburg, RFA (1979).
- 19) J. Mc Winn: "Ein Beitrag Zur Suche nach dem Element 114 in der Natur". Tese de Doutorado, Köln, RFA (1975).
- 20) M. Qaqish, C.B. Besant: Nucl. Instr. Meth. 138, 493-505 (1976).
- 21) B.G. Cartwright, E.K. Shirk, P.B. Price: Nucl. Instr. Meth. 153, 453-460 (1980).

- 22) H.Z. Dutra: "Polícarbonato CR-39 como Detector de traços de Fissão Induzida em Reator". Dissertação de Mestrado em andamento, PUC/RJ.
- 23) Y. Nishiwaki, T. Tsuruta, K. Yamazaki: J. Nucl. Sci. Technol. 8, 162-166 (1971).
- 24) R. P. Cunha: "Determinação de Urânio e Tório em Amostras Ambientais por traços de Fissão". Dissertação de Mestrado, PUC/RJ (1985).
- 25) M.L.C.P. de Carvalho, João A. Medeiros: "Determinação de Urânio em Folhas de Alumínio por Traços de Fissão". Trabalho a ser publicado, PUC/RJ (1986).
- 26) J.F.A. Pereira, J.J.S. Estrada, D.A.C. Binns, M. Urban: "Técnica de Medida de Radônio no Ar Utilizando um Detector Plástico de Traços". IRD - CNEN - RJ (1983).
- 27) G.A. Wagner: Nucl. Track Detectors, 2,1, 51-64 (1977).
- 28) C.A. Azevedo: "Determinação de Urânio em Sangue por Traços de Fissão". Dissertação de Mestrado em andamento, PUC/RJ.
- 29) A.C.M. Ferreira: "Determinação de Tório em Amostras de Material Biológico do Morro do Ferro por Traços de Fissão". Dissertação de Mestrado em andamento; PUC/RJ.
- 30) M. Sakanoue, M. Nakaura, T. Imai: Inter. Symp. on Rapid Methods for Measurement of Radioactivity in the Environment, München (1971).
- 31) J.S. Armijo, H.S. Rosenbaum: J. Appl. Phys. 38, 2064-2069 (1967).
- 32) B. S. Carpenter: J. Radioanal. Chem. 19, 233-234(1974).
- 33) K. Thiel, G. Damm: "A Sensitive Mapping Technique for Bismuth Using  $\alpha$ - Particle Tracks" - IX Conf. SSNTD, München (1976).
- 34) J.H. Fremlin, M.I. Edmonds: Nucl. Instr. Meth. 173, 211-215 (1980).
- 35) R.L. Fleischer, P.B. Price, R.M. Walker: Rev. Sci. Instr. 34, 510-512 (1963).  
R.L. Fleischer, J.R.M. Viertl, P.B. Price: Rev. Sci. Instr. 43, 1708-1709 (1972).
- 36) P. Vater, G. Tress, R. Brandt, B. Genswürger, R. Spohr: Nucl. Instr. Meth. 173, 205-210 (1980).
- 37) Kodak - "Instructions for the Use of CA 80 - 15 Film." Laboratoires de Recherches - Kodak - Pathé (1976).
- 38) K.K. Dwivedi, S. Mukherji: Nucl. Instr. Meth. 159, 433 - 438 (1979).

**LEITORES INTERESSADOS NESTA PUBLICAÇÃO  
FAVOR ENCAMINHAR SEUS PEDIDOS PARA  
IEN - BIBLIOTECA**

**INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR  
CAIXA POSTAL 68550  
21945-970 - RIO DE JANEIRO, RJ  
BRASIL**