

# SISTEMAS DE FILTRAGEM

Vito Roberto Vanin

Instituto de Física - USP

Laboratório do Acelerador Linear

## 1. Introdução.

A utilização de sistemas multidetetores permitiu superar uma das dificuldades da espectroscopia gama de alta resolução, representada pela baixa eficiência dos detetores semicondutores. Como o nuclídeo de interesse é, na maior parte das vezes, produzido simultaneamente com outros, um sistema de seleção capaz de observar grandezas que permitam a identificação de um nuclídeo específico aumenta consideravelmente a qualidade dos dados obtidos. São características desejáveis dos sistemas de filtragem uma eficiência elevada para não comprometer a eficiência total de detecção e também, se possível, alta resolução.

## 2. Produção de núcleos com spin elevado.

Reações de fusão-evaporação com íons pesados permitem, por causa do elevado valor do momento angular máximo transferido

$$l_{\max} = k R_c (1 - B/E)^{1/2},$$

observar-se níveis com momento angular até cerca de  $60 \hbar$ . Nas reações com núcleos pesados, prefere-se estudar os produtos das reações ( fusão, xn ), onde há interferência significativa dos canais de ( fusão, fissão ) para núcleos compostos com A maior ou da ordem de 190 e alguma interferência dos canais pxn e axn. Reações de transferência também tem sido observadas eventualmente. Nos núcleos mais leves, A menor ou da ordem de 100, muitos canais

$n\gamma\alpha$  são alimentados significativamente, sendo feliz a situação em que o nuclídeo de interesse responde por algo como 20% da seção de choque total.

Além do conjunto de espectros "prompt" de todas as reações concorrentes, observa-se ainda a produção de raios-X (PIXE), os gamas provenientes de excitação Coulombiana, reações com o suporte e o revestimento do alvo, reações secundárias induzidas pelos nêutrons evaporados e, finalmente mas incomodando mais que as demais interferências citadas neste parágrafo, a atividade residual do alvo.

Neste caso, conjuntos de cintiladores abrangendo um ângulo sólido tão próximo de  $4\pi$  esfero-radiano quanto possível, tiveram grande sucesso, porque eliminam praticamente toda a interferência devida à atividade residual e aos demais efeitos secundários que originam cascatas gama de baixa multiplicidade e permitem sistematicamente uma separação razoável dos diferentes canais de evaporação de partículas em sistemas médios e pesados e, às vezes, permitem alguma separação dos canais de fissão.

Já reduzindo a expectativa em relação ao valor do momento angular máximo observável, a fissão de núcleos pesados proporciona eventualmente a única maneira de observar níveis de alto spin nos núcleos ricos em nêutrons de massa intermediária. Neste caso, o momento angular parece surgir de vibrações no pescoço perpendiculares à direção de fissão [1].

A figura 1 apresenta os spins médios dos fragmentos de fissão de três sistemas diferentes [2,3]. Note-se que o spin médio é razoável, e a fissão espontânea e a induzida produzem fragmentos com momento angular comparável. A fissão espontânea tem, porém, uma grande vantagem - produz núcleos afastados da linha de estabilidade beta, enquanto a fissão induzida com íons pesados produz núcleos sobre a linha de estabilidade beta que podem, embora com dificuldade, serem obtidos através de reações mais específicas e portanto mais adequadas à espectroscopia gama. A figura 2 corresponde ao esquema de níveis do  $^{144}\text{Ba}$  obtido por Phillips et al [4] com uma fonte de  $^{252}\text{Cf}$  utilizando 7 detectores de HPCe com supressão Compton, um detetor de HPCe para raios-X e um filtro de multiplicidade constituído de 14 detectores de cintilação de Germanato de Bismuto.

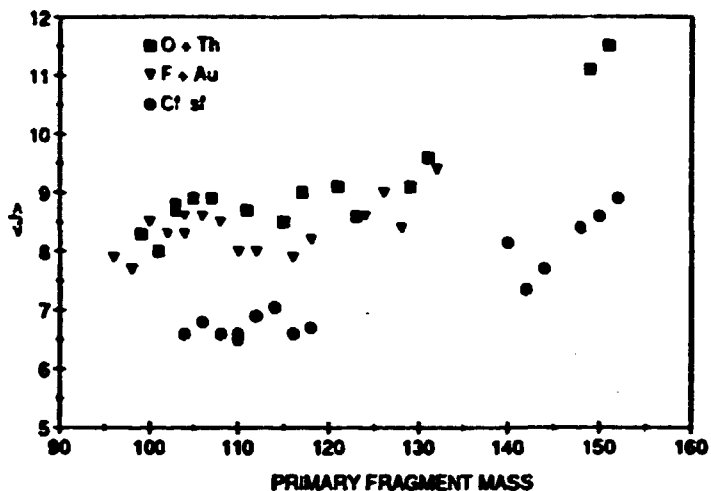


Figura 1. Spins médios dos fragmentos de fissão em três sistemas diferentes [2,3].

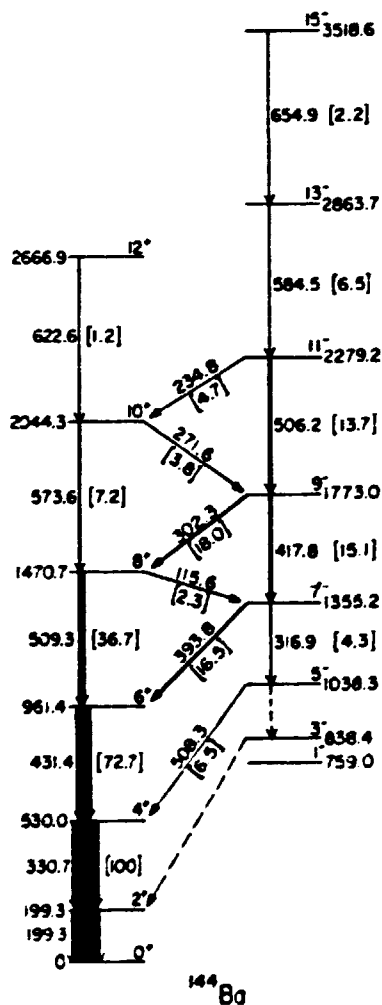


Figura 2. Esquema de níveis do  $^{144}\text{Ba}$ , observado por Phillips [4] em medidas de espectroscopia gama de uma fonte de  $^{252}\text{Cf}$ . Energias em keV.

No experimento descrito por Phillips [4], o filtro de multiplicidade tem atuação marginal devido à relativamente pequena diferença de multiplicidade gama entre a atividade residual e os produtos primários de fissão. Uma possibilidade a explorar consiste em selecionar o resíduo primário de fissão através do Raio-X característico. Para não comprometer a eficiência total de detecção, deve-se ter uma alta eficiência para os Raios-X característicos ( entre 20 e 40 keV ) sem absorver significativamente os raios gama de maior energia ( acima de 100 keV ), o que sugere a construção de um multidetector de Raios-X, utilizando material de Z elevado, como será discutido a seguir.

### 3. A produção de Raios-X característicos pela fissão.

Há duas origens para os Raios-X provenientes dos resíduos de fissão espontânea - preenchimento de um buraco na camada K da coroa eletrônica dos produtos primários, provenientes do rearranjo dos elétrons após a fissão, e conversão interna das transições eletromagnéticas dos produtos de fissão.

A Tabela 1 apresenta os valores da produção de Raios-X pelos produtos primários da fissão espontânea de alguns nuclídeos, medidos por Reisdorf et al. [5] .

TABELA 1

Produção de Raios-X, por fissão, de alguns nuclídeos que apresentam fissão espontânea. A precisão relativa é 5% e a absoluta, 20% [5] .

nuclídeo	fragmento	
	leve	pesado
<sup>252</sup> Cf	0,098	0,235
<sup>239</sup> Pu	0,071	0,134
<sup>235</sup> U	0,045	0,118
<sup>233</sup> U	0,039	0,123

A produção de Raios-X pelos produtos primários representa cerca de 60% da produção total de Raios-X característicos [6], viabilizando a utilização desses Raios-X como assinatura do núcleo residual primário.

#### 4. Detetores de $\text{HgI}_2$

A tabela 2 apresenta a meia-espessura de absorção de fótons pelo Si, Ge e  $\text{HgI}_2$  para algumas energias de fótons.

TABELA 2

Meia-espessura de absorção de fótons de algumas substâncias que podem ser utilizadas para construir detetores, em  $\text{g/cm}^2$  [7] .

$E_\gamma$ (keV)	$\rho d_{1/2}$ ( $\text{g/cm}^2$ ) para		
	Si	Ge	$\text{HgI}_2$
20	0,16	0,017	0,014
40	1,00	0,112	0,038
100	3,8	1,26	0,20
1000	10,9	12,1	11,0

Note-se que quanto maior o número atômico do material, mais opaco a Raios-X ele é, sem perder a transparência para gamas de energia acima de 100 keV. Além disso, na realização prática de um detetor de Raios-X transparente para gamas, os detetores de Si e de Ge apresentam o inconveniente de necessitarem de refrigeração, o que demanda suportes condutores de calor que serão, provavelmente, opacos aos Raios-X. Já o detetor de  $\text{HgI}_2$ , devido ao grande "gap" de energia entre as bandas de condução e valência nos monocristais, 2,2 eV, pode operar a temperaturas próximas da ambiente, permitindo montagens menores, mais ajeitadas e transparentes aos gamas. A figura 3 apresenta os espectros de Raios-X do Mg, Mn e Cu obtidos por J.S.Iwaczyk [8], utilizando FET refrigerado a  $-40\text{C}$  e o cristal de  $\text{HgI}_2$  a cerca de  $0\text{C}$ , através de células Peltier.

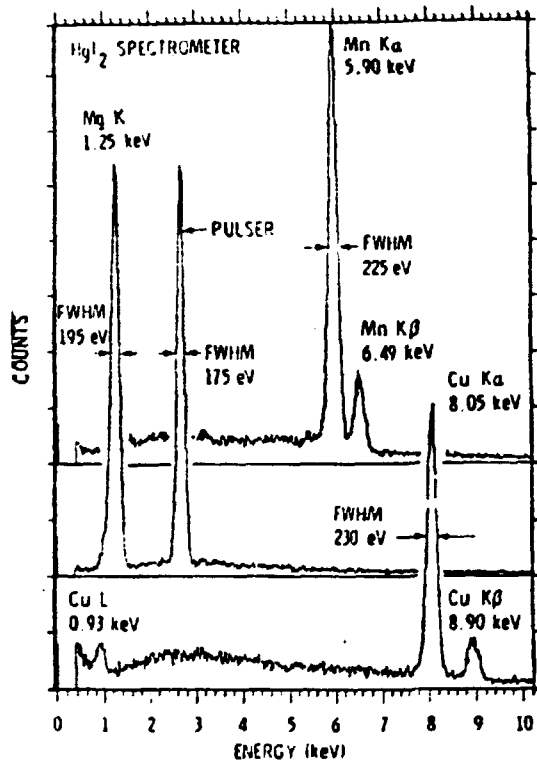


Figura 3. Espectros obtidos por Iwanczyk [8] com um detector de HgI<sub>2</sub>.

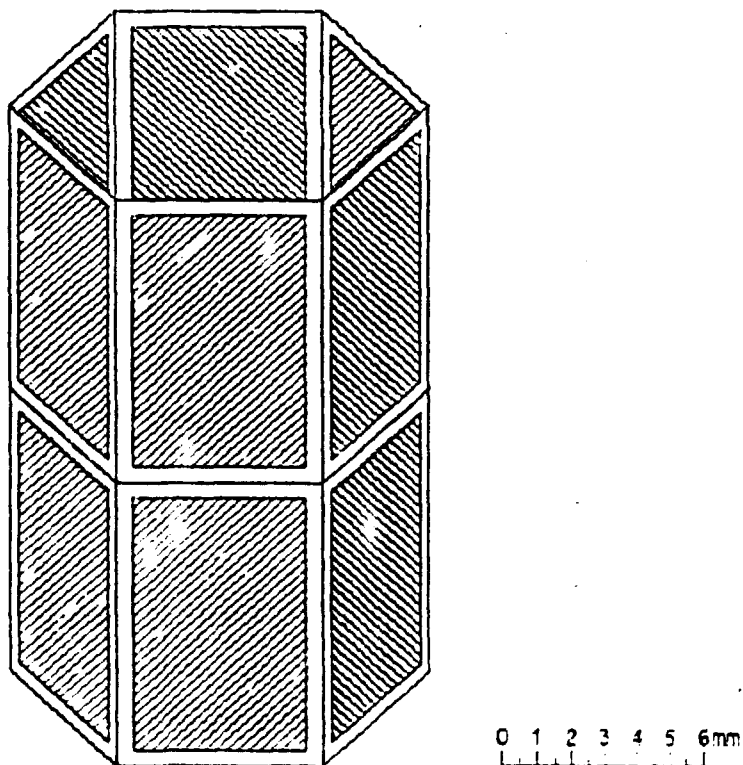


Figura 4. Esboço da montagem dos detectores de HgI<sub>2</sub> no multidetector proposto.

Por que detetores de  $\text{HgI}_2$  não são utilizados mais frequentemente? Uma parcela do mistério explica-se por não ter sido possível, até hoje, crescer cristais de  $\text{HgI}_2$  grandes, para detecção de gamas. No entanto, parece ser possível crescer sistematicamente cristais de  $30 \text{ mm}^2$  de área e espessura entre 0,1 e 0,4 mm, já havendo experiência no Brasil a respeito [9]. Essa limitação de tamanho, porém, não nos incomoda, essas dimensões são as adequadas para o dispositivo que pretendemos desenvolver.

Outra dificuldade está ligada à estabilidade do cristal. Devido à alta pressão de vapor do  $\text{HgI}_2$  à temperatura ambiente, perde-se material sob os eletrodos, provavelmente, exigindo encapsulamento do detetor [10]. Para utilização por períodos inferiores a 1 ano, encapsulamento em acrílico parece ser suficiente [10]. A montagem também requer cuidados especiais, desde que normalmente utilizam-se fios de Au, elemento que forma amálgama com Hg.

Finalmente, muito do desenvolvimento desses detetores parece ligar-se às aplicações no espaço [8,10], o que pode estar relacionado à divulgação limitada e retardada dos progressos obtidos na produção desses dispositivos, bem como ao desenvolvimento em direção diferente à demandada pela espectroscopia gama.

## 5. A barrica de $\text{HgI}_2$

A figura 4 ilustra a barrica de  $\text{HgI}_2$  como pretendemos construir. A proposta é montar um dispositivo contendo 12 detetores de cerca de  $5 \times 8 \times 0,15 \text{ mm}^3$ , formando dois hexágonos superpostos, com raios de cerca de 6 mm, na forma de uma barrica. Abaixo dos detetores montam-se os transistores do primeiro estágio de amplificação dos 6 detetores abaixo e, acima, dos outros detetores, apoiando-se a montagem dessa parcela do pré-amplificador numa extensão da moldura dos detetores da barrica.

Para uma fonte de  $^{252}\text{Cf}$  colocada no centro geométrico da barrica, espera-se uma eficiência de cerca de 50% para os Raios-X dos resíduos pesados de fissão.

O complemento desse sistema corresponde a um sistema de detectores de HPCe dotados de supressão Compton. A detecção de um fóton de qualquer energia por um dos detectores da barrica dispara o gatilho de um sistema de coincidência  $\gamma$ - $\gamma$ -X, que deve ser validado pela coincidência  $\gamma$ - $\gamma$  nos detectores de HPCe.

Para avaliar o desempenho desse sistema em uma medida dos espectros gama de alto spin dos produtos de fissão do  $^{252}\text{Cf}$  (3,1% de fissão espontânea), suponhamos uma fonte de 2 MBq e a possibilidade de disparar tanto pelo Raio-X característico do fragmento leve quanto do pesado (cerca de 30% das fissões). Nesse caso, é possível marcar  $10^4$  eventos por segundo, de um total de  $6 \cdot 10^4$  fissões/s. Com um sistema de 6 detectores de Ge, cada um com eficiência de cerca de  $2 \cdot 10^{-3}$ , tem-se uma eficiência de coincidência de  $6 \cdot 10^{-5}$ . Supondo que são emitidos 8 fótons por fissão em média, espera-se observar coincidência  $\gamma$ - $\gamma$  numa fração de  $4 \cdot 10^{-3}$  dos eventos, o que resulta em cerca de 40 eventos por segundo, ou  $3 \cdot 10^6$  eventos marcados por dia. Em um mês, isso significa cerca de  $5 \cdot 10^6$  eventos limpos de cada um dos canais mais intensos da fissão. O número total de contagens depende da eficiência dos supressores Compton e da resolução temporal do sistema, sendo estimado em  $10^9$  eventos por mês, ou seja, cerca de 50 fitas magnéticas de 2400 pés, 6250 bpi, por mês.

A durabilidade dos detectores de Ge parece ser a principal barreira relativa ao tempo de contagem, desde que o fluxo de nêutrons da fonte utilizada na avaliação acima é comparável ao observado em medidas em linha nas irradiações com íons pesados. Nenhuma outra razão parece ser capaz de dificultar a medida por tempos extremamente longos (anos), condição suficiente para que os esquemas de níveis dos produtos de fissão menos abundantes possam ser medidos.

## 6. Outros usos da barrica de $\text{HgI}_2$

O detector de  $\text{HgI}_2$  tem muitas aplicações tecnológicas devida à possibilidade de construir-se um detector muito pequeno, desde que é um semi-condutor à temperatura ambiente e tem elevado coeficiente de absorção para fótons. Aqui, porém, limitar-me-ei a



discutir umas poucas outras aplicações imediatas à espectroscopia nuclear.

Um estudo detalhado da fissão, correlacionando as propriedades dos pares de fragmentos é, claro, uma possibilidade, que pode ainda ser estendida com a inclusão de outros detectores.

Nas medidas dos espectros gama que seguem o decaimento  $\beta^+$  e a Captura Eletrônica de núcleos afastados da linha de estabilidade, este detector permitiria distinguir as transições provenientes dos diferentes membros da cadeia, porque sua grande eficiência permite a medida da coincidência entre o gama e o Raio-X característico. Também permite medir o "end-point" do espectro de Bremsstrahlung interno de muitos nuclídeos com grande precisão ( dezenas ou centenas de eV ). Pode, portanto, permitir uma melhoria significativa da precisão e um rebaixamento significativo do limiar de detecção efetivo das medidas de atividade residual em situações difíceis de medida.

Iwaczyk [8] informa que o detector que construiu suportou taxas de até  $1,4 \cdot 10^5$  contagens por segundo. Confirmada essa capacidade dos detectores de  $HgI_2$ , torna-se possível utilizar a barrica de  $HgI_2$  como filtro nas medidas de espectroscopia gama em linha nas irradiações com íons pesados, quando o nuclídeo de interesse tem muitas transições que apresentam conversão interna significativa - núcleos rotacionais em geral e boa parte dos núcleos ímpar-ímpares.

Certamente um pouco mais de imaginação basta para achar outros usos deste detector. É preciso, porém, realizá-lo, única prova de que ele funciona. Funcionando, aplicações não faltarão!

## 7. A colaboração que tenta implementar o detector.

Estamos preparando uma colaboração entre a divisão de Desenvolvimento de Detectores do IPEN (CNEN,SP), a divisão de Radioproteção do CDTN ( CNEN,MG) e o Laboratório de Acelerador Linear (IFUSP,SP), para o desenvolvimento desses detectores. O crescimento de cristais está a cargo do pessoal da CDTN, a montagem e teste a cargo do pessoal do IPEN e o teste em condições

reais de medida, a cargo do pessoal do LAL que deve, também, ajudar na montagem do FET refrigerado e do pré-amplificador.

### REFERENCIAS

- [1] Nix e Swiatecki, Nucl. Phys 71(1965) 1.
- [2] Y. Abdelrahman et al., Phys Lett. 99B (1987) 504.
- [3] W.R.Phillips, Proceedings da Conferência da IUPAP de 1989, Brasil, volume 2 (1989) 363 .
- [4] W.R.Phillips et al. Phys. Rev Letters 57(1986)3257.
- [5] Reisdorf et al., Nucl Phys. A 177 (1971) 337.
- [6] J.L.Aliaga, D.R.Napoli, D.Otero e A.N.Proto, Nucl. Instr. Meth. A247 ( 1986 ) 511.
- [7] E.Storm e H.I.Israel, Nucl Data Tables A7 (1970) 565 .
- [8] J.S.Iwanczik, Nucl. Instr. Methods A283 (1989) 208
- [9] L. O. Faria e A. G. Oliveira, Journal of Crystal Growth 83 (1987) 101
- [10] M.R.Squillante, K.S.Shah e L. Moy, Nucl. Instr. Meth. A288 (1990) 79 .