

Detecção de nêutrons e gamas em Física de Reatores

Reator Nuclear IPEN/MB-01

Prof. Dr. Ulysses D'Utra Bitelli

Monitor: Renato Kuramoto

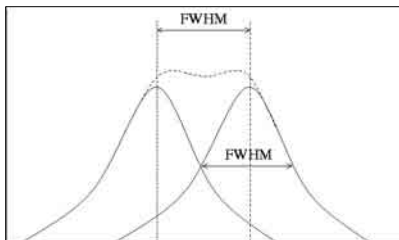
1. Características gerais dos detectores;
2. Detectores à gás;
3. Detectores semicondutores de nêutrons;
4. Detectores Cintiladores de γ ;
5. Detectores semicondutores de γ (HPGe);
6. Eletrônica Nuclear padrão NIM;

Características gerais dos detectores

Sensitividade: capacidade do detector produzir um sinal eficaz para um dado tipo de radiação;

Resposta: capacidade do detector obter informações sobre energia-tempo da partícula;

Resolução em energia: capacidade do sistema de detecção discriminar duas energias próximas;



$$R(\%) = \frac{FWHM}{E} = \frac{\Delta E}{E}$$

$FWHM = \text{Full Width at Half Maximum}$

Exe: NaI(Tl), $R=8-9\%$

HPGe, $R=0.1\%$

$$R = \sqrt{R(d)^2 + R(e)^2}$$

$R(d)$ =resolução intrínseca do detector;

$R(e)$ =resolução da eletrônica;

Pico resolvido: distância entre as centróides $> FWHM$;

Fator de Fano: correção para a estatística de Poisson no processo de deposição de energia de uma partícula no volume ativo do detector;

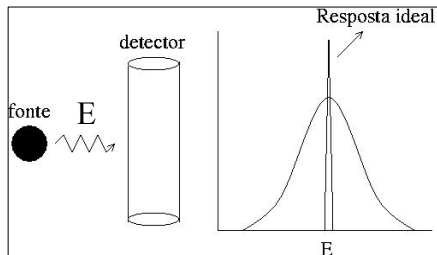
$$R = 2.35 \frac{\sqrt{FJ}}{J}$$

J =número de ionizações

Exe: NaI(Tl), $F=1$
HPGe, $F=0.1$



Função resposta: espectro de altura de pulsos do detector referente à um feixe monoenergético;



Dependências: dimensão do detector, geometria, composição(Z), blindagem, tipo de radiação, etc.

$$\text{espectro de energia} = \int dE' S(E') R(E, E')$$

$$\text{Resposta ideal } R(E, E') = \delta(E, E')$$

Exe: função resposta de detectores de radiação- γ

Eficiência: probabilidade do sistema registrar um evento;

$$\varepsilon_{\text{total}} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos emitidos pela fonte}}$$

$$\varepsilon_{\text{intrínseca}} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos que atingem o detector}}$$

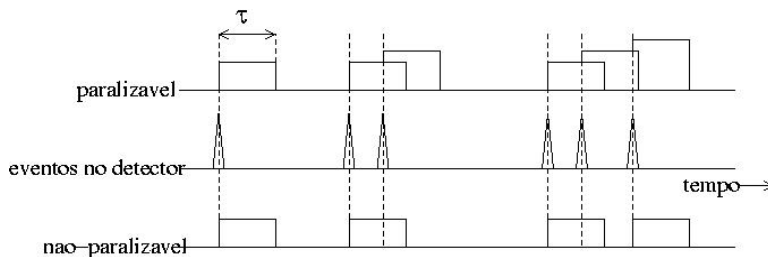
$$\varepsilon_{\text{geométrica}} = \frac{\Delta\Omega}{4\pi}$$

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_{\text{intrínseca}} \varepsilon_{\text{geométrica}}$$

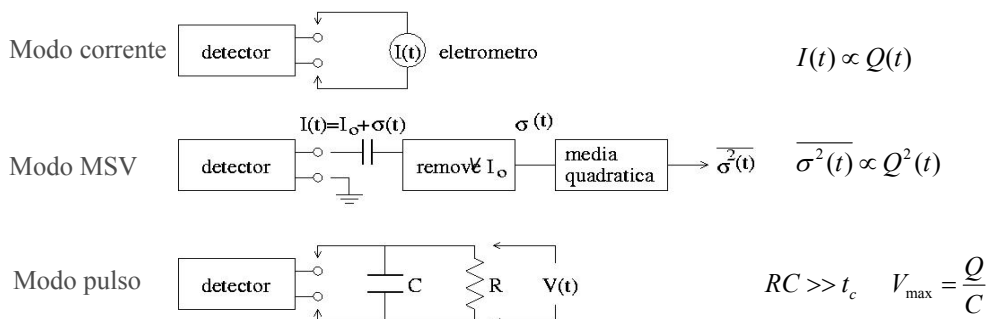


Tempo morto τ : período de tempo necessário para o detector processar um evento;

Empilhamento: sobreposição de dois eventos que estão separados por um intervalo de tempo menor do que τ (se o detector permanecer sensível);

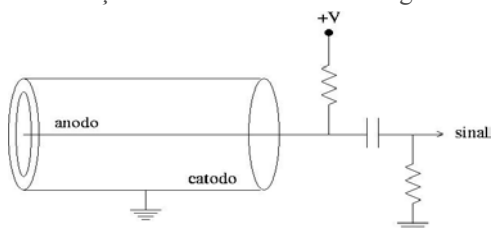


Modos de operação: modo pulso, modo corrente e Campbell/MSV (*Mean Square Voltage*);

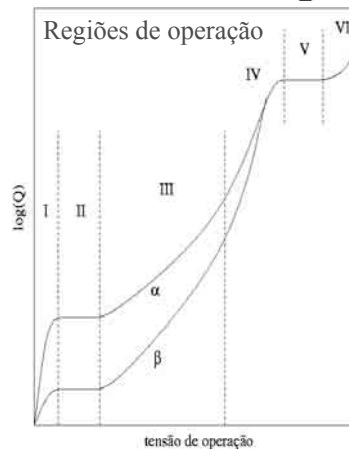
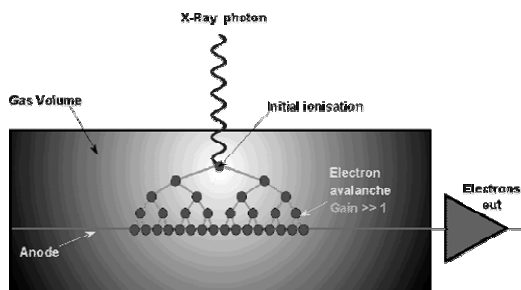


Detecores à gás

Construção básica de um detector à gás



Avalanche em contadores proporcionais



- I. recombinação
 - II. câmara de ionização
 - III. contador proporcional
 - IV. limite de proporcionalidade
 - V. Geiger-Müller (GM)
 - VI. Descarga contínua
- Gases típicos + *quenchers*:
- Argônio, Xe, Hidrogênio
 - P10 (90% Ar + 10% CH₄)
 - BF₃ e ³He

Conversor: material com o qual o nêutron interage produzindo uma partícula carregada ou um fóton;

Reações de conversão: (n, p) (n, α) $(n, \text{fissão})$ $p(n, n')p'$

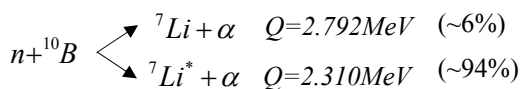
Detectores: BF_3 (trifluoreto de boro)	→ $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$
^{10}B	→ $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$
^3He	→ $^3\text{He}(n, p)t$
Câmaras de fissão	→ $^{235}\text{U}(n, \text{fissão})$
Câmaras de ionização compensadas (CIC)	→ $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$
Câmaras de ionização não compensadas (CINC)	→ $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$
Próton de recuo	→ $p(n, n')p'$

Detectores BF_3

Detectores proporcionais preenchidos com BF_3 , usualmente enriquecido à mais que 90% em ^{10}B (20% do boro natural está na forma de ^{10}B , o restante é ^{11}B);

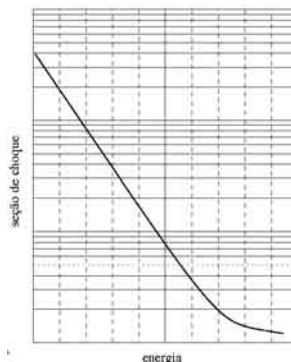
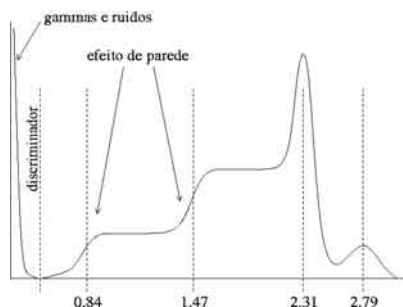
Grande seção de choque, ~ 3840 barns na região térmica;

BF_3 tem boas propriedades proporcionais (avalanche e *quenching*);



Conservação do momento linear para $Q=2.792\text{MeV}$:

$$E(^7\text{Li}) = 0.84\text{MeV} \quad E(\alpha) = 1.47\text{MeV}$$



Pressão $\sim 0.1-0.5\text{atm}$;

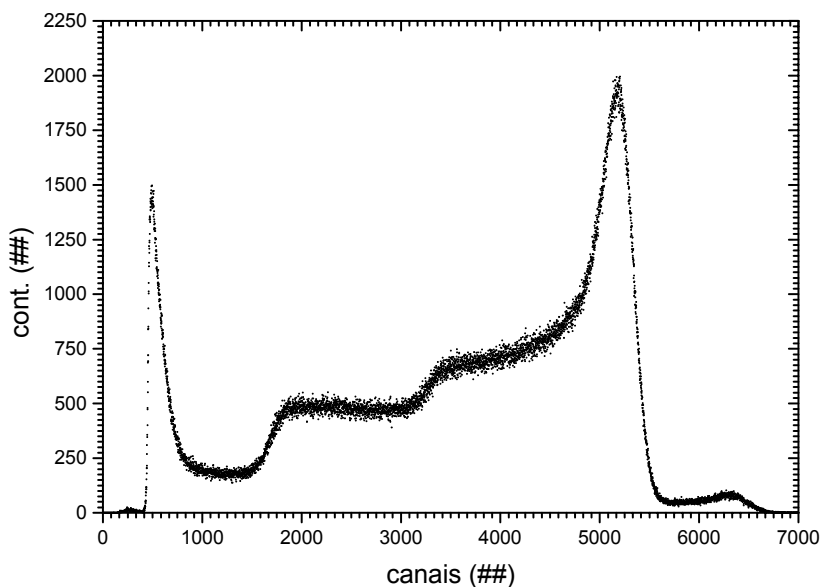
Tensão de operação $\sim 1000-3000\text{V}$;

Devido à baixa pressão o BF_3 é menos sensível γ ;

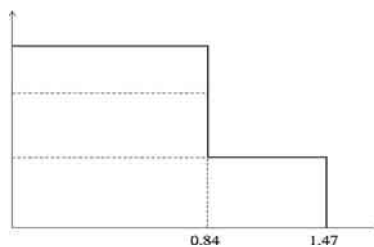
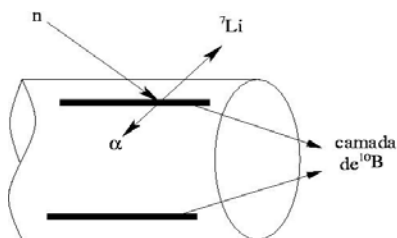
A discriminação entre n e γ é facilitada devido ao alto Q ;



Espectro de um detector BF_3



Detectores proporcionais que utilizam a mesma reação de conversão dos BF_3 , todavia o ^{10}B está presente em uma camada sólida.



Detector é preenchido com gases com melhores propriedades proporcionais, como por exemplo o P10 (10% Ar e 90% CH_4). Vantagem no caso de sinais rápidos para espectroscopia de tempo;

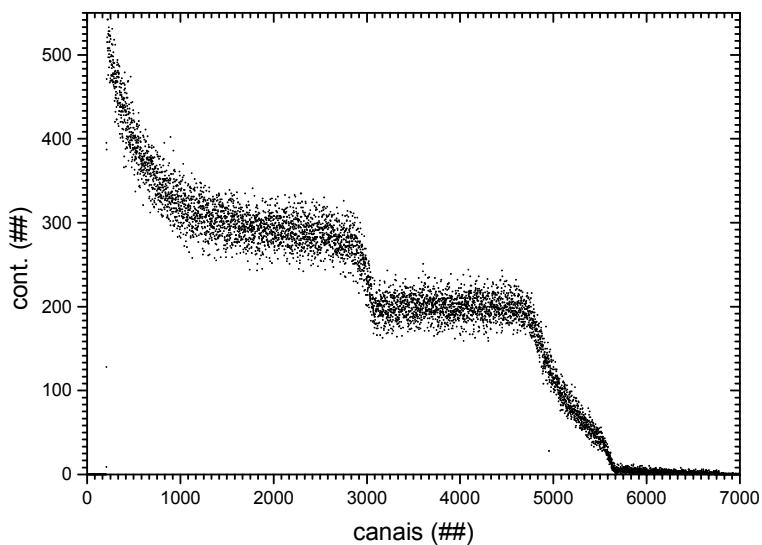
Devido à estes gases, as tensões de operação são mais baixas que as dos BF_3 (900-1100V);

Reduz a degradação química das moléculas de BF_3 pela radiação- γ ;

O espectro largo em energia dificulta a discriminação entre n e γ ;



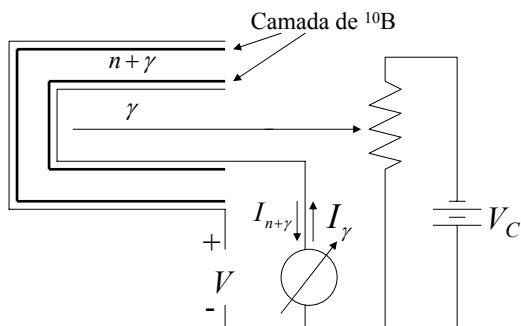
Espectro de um detector ¹⁰B



Detectores à gás que operam na região de tensão das câmaras de ionização.

Para uma câmara de ionização com ¹⁰B, temos: $I = 1.02 \times 10^{-14} \Phi S (\text{Amperes})$

$\Phi S = \#$ de reações por segundo na região ativa



Câmara de ionização compensada CIC

Características de operação:

tensão de compensação = $V_c \approx -25V$

tensão positiva = $V \approx +800V$

gases: nitrogênio, xenônio, hidrogênio;

pressões = 0.78 – 3.29 atm

fluxos para CINC > $10^7 \text{ n/cm}^2\text{s}$

fluxos para CIC > $10^3 - 10^7 \text{ n/cm}^2\text{s}$

Detecores proporcionais à gás que utilizam a seguinte reação de conversão: $n + ^3\text{He} \rightarrow p + t + 765\text{keV}$

Alta seção de choque com comportamento $1/v$: 5400barns na região térmica ($\sim 0.025\text{eV}$);

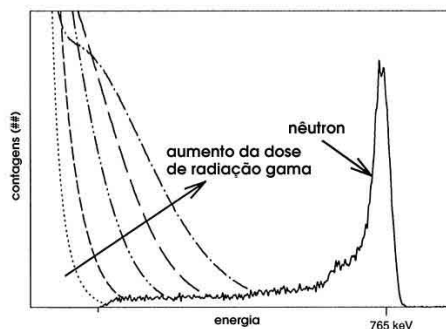
Efeitos de parede em: $E(t) = 192\text{keV}$, $E(p) = 573\text{keV}$

Efeitos da radiação- γ : ^3He é mais sensível à γ devido à maior pressão de operação $\sim 4.5\text{atm}$;

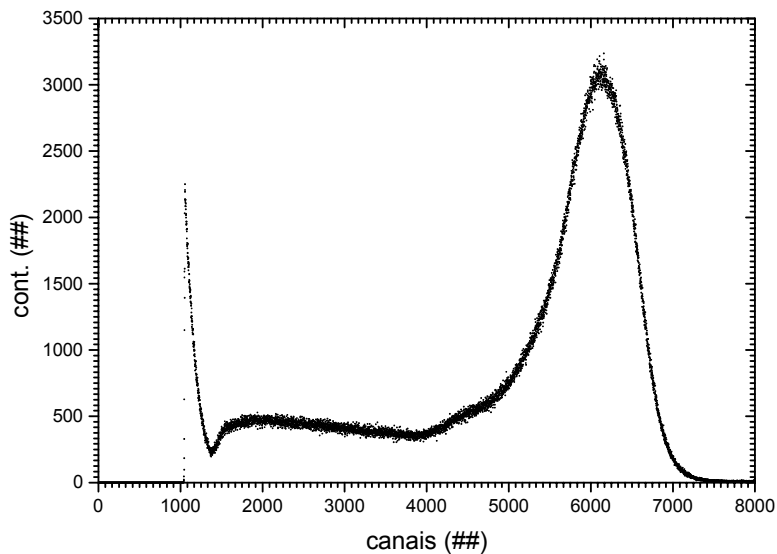
O baixo $Q = 765\text{keV}$ dificulta a discriminação γ - n ;

Devido à alta pressão de operação, a tensão também é elevada;

A alta pressão e a alta seção de choque (n, p) tornam os ^3He muito sensíveis;



Espectro de um detector ^3He



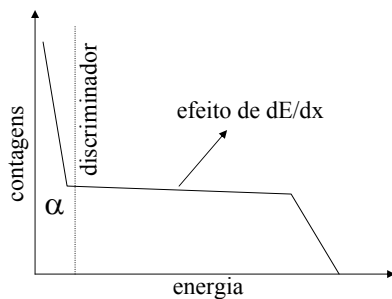


Câmaras de ionização que utilizam reações de fissão para conversão.

Composições típicas: 90% ^{234}U (fêtil) 10% ^{235}U (fissil)
 ^{238}U (fêtil) - ^{235}U (fissil)

Devido ao alto $Z \sim +20e$ dos produtos de fissão, não é necessária a multiplicação no gás.

Discriminação n- γ mesmo em doses elevadas: $\sim 10^5 \text{ rads/h}$ (BF_3 - alguns rads/h)



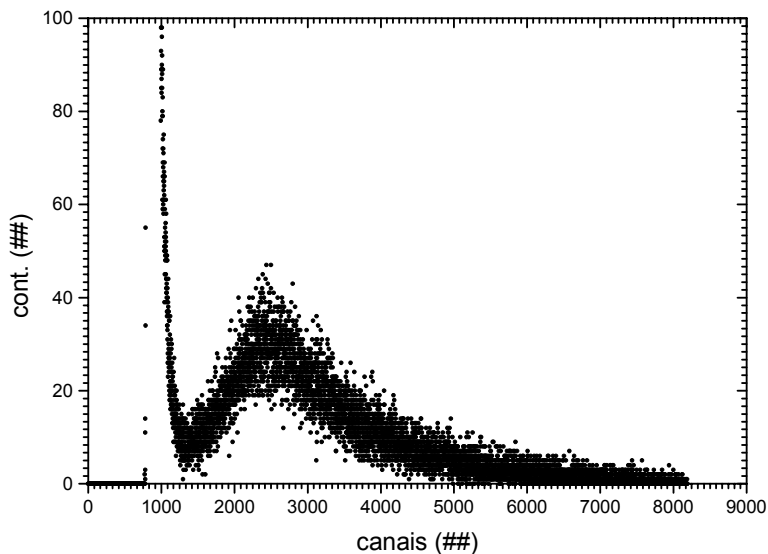
Espectro de uma CF

Características de operação:

tensões de operação $\approx 200 - 500\text{V}$
Gás: P10 (90% argônio e 10% CH_4)
pressões $\sim 1 \text{ atm}$



Espectro de uma Câmara de Fissão

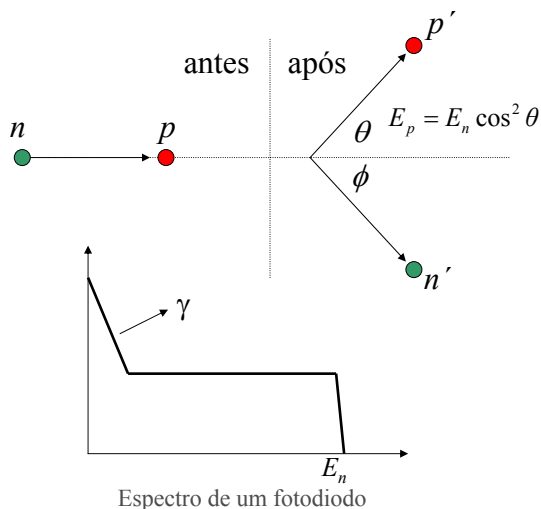




Cristais semicondutores (Si), envolvidos em um material conversor plástico (*Mylar*, polietileno, etc.);

Reação de conversão: $p(n,n')p'$ (próton de recuo);

Sendo o mecanismo de conversão simples, há a possibilidade de se determinar o espectro de energia de nêutrons através de cálculos de **deconvolução**;



Deconvolução:

$$P(E)dE = \int_0^{E_{\max}} R(E, E')S(E')dE'$$

$R(E, E')$ = função resposta;

$S(E)$ = espectro dos prótons de recuo;

E = energia dos prótons;

Características de operação:

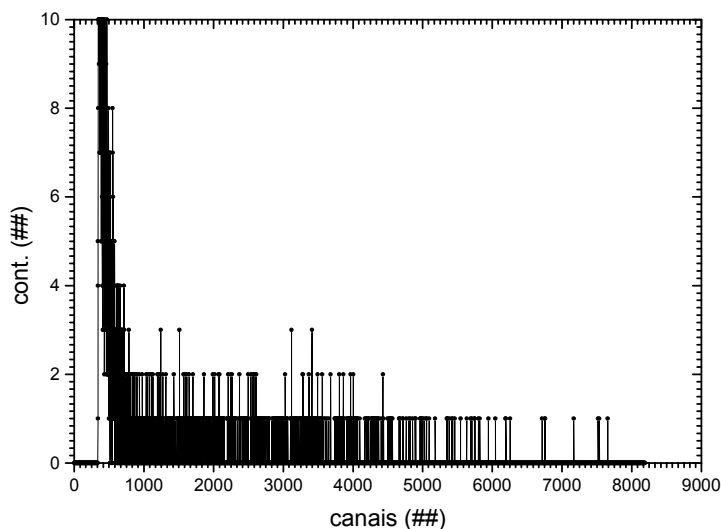
tensões de operação $\approx 10 - 100V$

espessura do conversor $\sim 1.1mg / cm^2$

áreas efetivas do cristal $\sim mm^2 - cm^2$



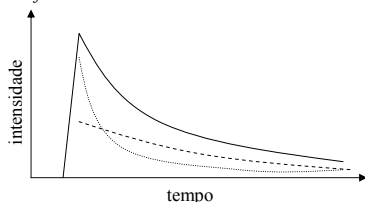
Espectro de um Fotodiodo



Detectores de radiação que utilizam o processo de *luminescência*;

Fluorescência: $10^{-8}s$

Fosforescência: estados metaestáveis



Características: linearidade, resposta rápida e discriminação pela forma do pulso.

Tipos de cintiladores:

Orgânicos: cadeias aromáticas.

rápido intervalo de decaimento (3-4ns).

cristais: $C_{14}H_{10}$, $C_{10}H_8$ (efeitos de *channeling*.)

líquidos: solutos = PBD, PPO, POPOP,...

solventes = tolueno, benzeno, ...

plásticos: solutos = PBD, PPO, POPOP,...

solventes = poliviniltolueno, ...

Cristais Inorgânicos: Haletos alcalinos com ativador (impureza).

Decaimento ($\sim 500ns$). Higroscópicos. Grande dE/dx .

Exe: NaI(Tl), CsI(Tl)

BGO = grande Z (alta eficiência fotoelétrica), não higroscópico

BaF₂ = componente rápida UV (500ps)

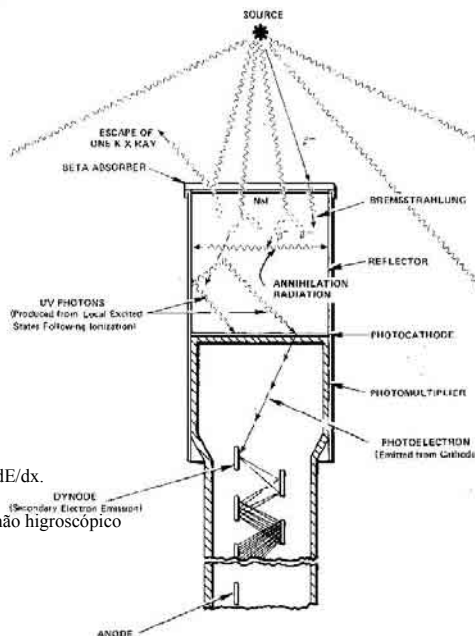
Cintiladores gasosos: gases nobres = Xe, Kr, Ar e He

Emissão UV (necessário *wavelength shifters*.)

Vidros: Silicatos de Li ou B ativados com Ce.

Deteção de $n: {}^6Li(n,\gamma){}^7Li$

Cintilador+fotomultiplicadora



Detectores Cintiladores - Fotomultiplicadoras

Fotomultiplicadoras (PM) são tubos multiplicadores de cargas que convertem a luz do cintilador em um sinal elétrico;

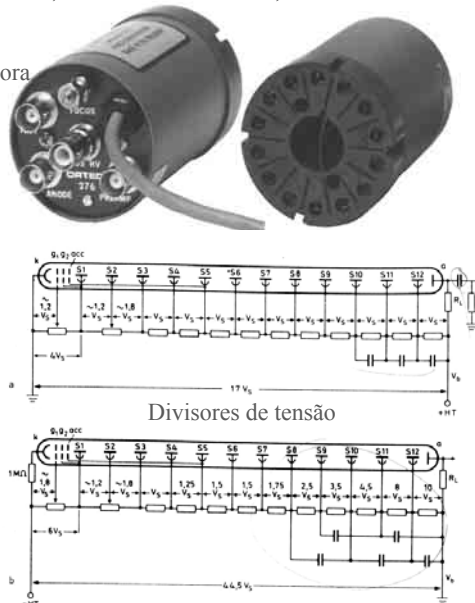
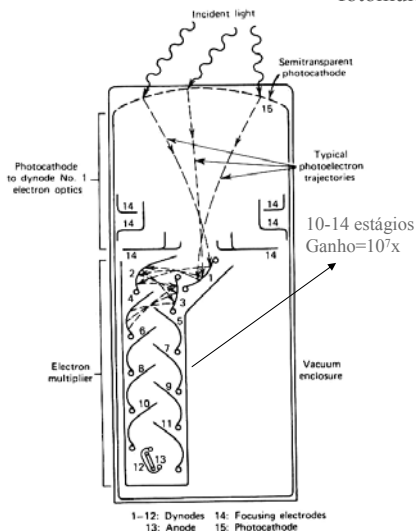
Corrente no anodo é proporcional ao número de fótons o qual é proporcional à energia da radiação incidente;

Fotocátodo: materiais fotosensíveis (SbCs, SbNa, 400-500nm) depositado na janela da fotomultiplicadora (vidro ou quartzo);

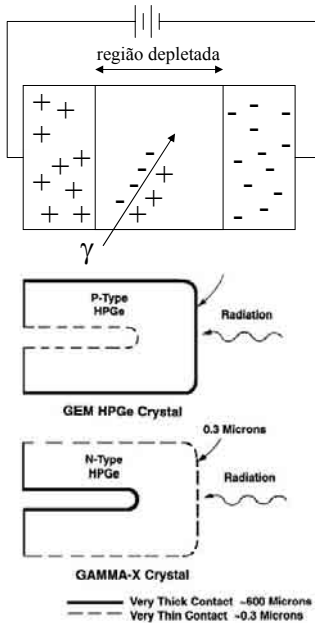
Dinodo: metais (Ag-Mg, Cu-Be) com alto *fator de emissão secundária* δ , e baixa *emissão termoiónica*;

Tensões de operação: 1-3kV;

Base da
fotomultiplicadora

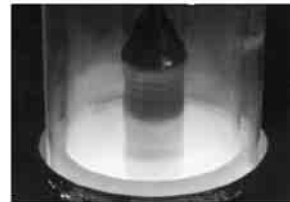
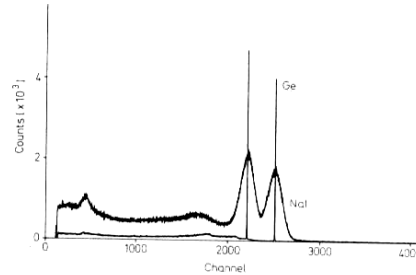


HPGe (High Purity Germanium)



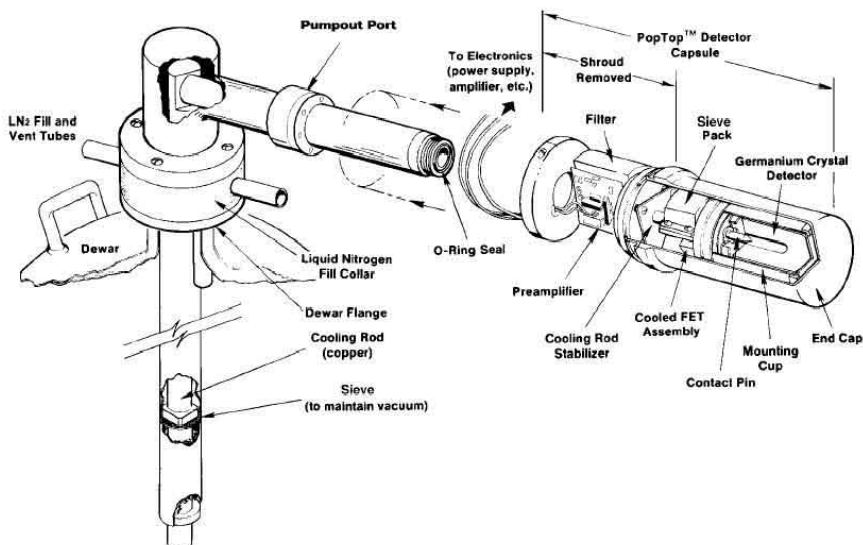
Vantagens:

1. Pequena quantidade de energia para produzir um par ($\sim 3.5eV$);
2. Resposta linear energia-pulso;
3. Alto $Z(\text{Ge})=32$, alta seção de choque fotoelétrica;
4. Refrigeração necessária somente com *bias*;
5. Alta resolução, 0.15% para o pico de 1.33MeV do ^{60}Co ($\sim 8\%$ para o NaI);

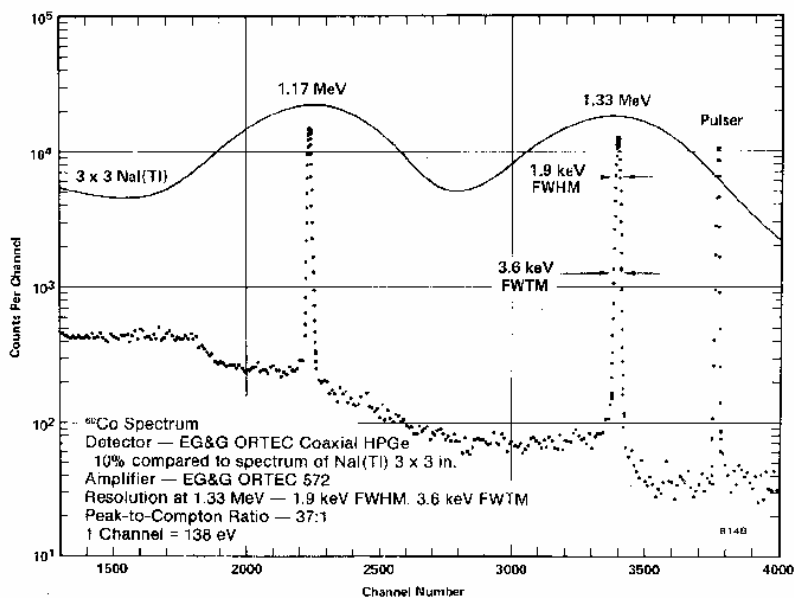


Detectores semicondutores - HPGe

Cristal, pré-amplificador, criostato e dewar de 30 litros



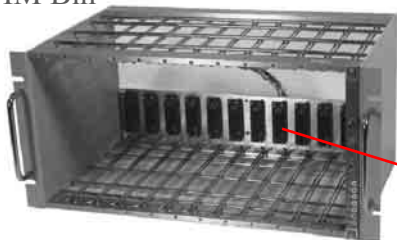
Espectro do ^{60}Co adquirido por um detector Cintilador e um HPGe



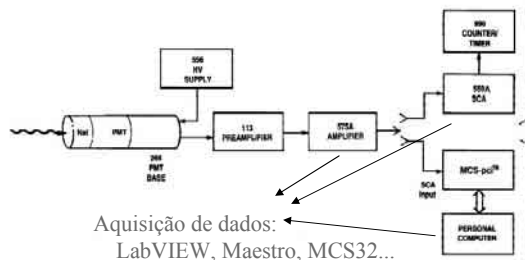
NIM – Nuclear Instrument Module

Eletrônica modular analógica e digital, que segue padrões elétricos e mecânicos para física nuclear;
Módulos: amplificadores, discriminadores, SCA, MCA, TAC, unidades lógicas, CFD, etc...

NIM Bin

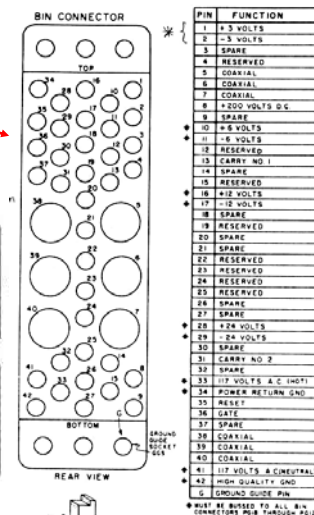


Cadeia eletrônica



Aquisição de dados:
LabVIEW, Maestro, MCS32...

Conectores do bin



Módulos

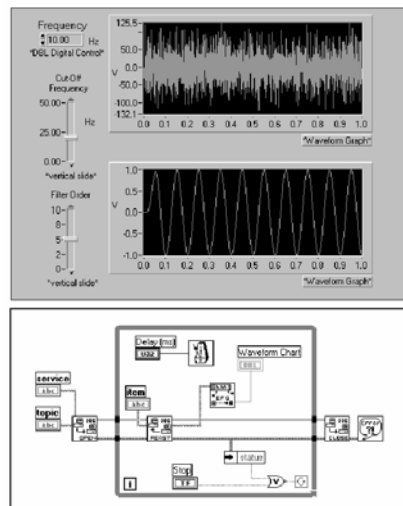
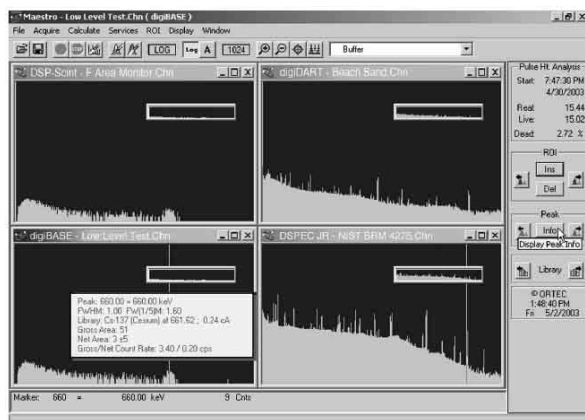


Espectros de energia: MAESTRO - ORTEC

Espectros de tempo: MCS32 - ORTEC

Aquisição programada: LabVIEW - NI

Processamento de dados: LabVIEW, C/C++, Fortran



W. R. Leo, “Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments”, Springer-Verlag (1992)

G. F. Knoll, “Radiation Detection and Measurements”, 2ed., John Wiley & Sons (1989)

N. Tsoulfanidis, “Measurements and Detection of Radiation”, 2ed., Taylor & Francis (1995)

W. J. Price, “Nuclear Radiation Detection”, 2ed., McGraw-Hill (1964)

A. D. Profio, “Experimental Reactor Physics”, John Wiley & Sons (1976)