

# DETECTORES

## Características Gerais

O princípio básico dos detectores é a transferência de **parte** ou de **toda** a **energia** da radiação incidente para o material do detector, onde é **convertida** noutra forma, mais acessível à percepção humana.

A **transferência** da energia incidente faz-se por **excitação** e **ionização** dos átomos e/ou moléculas do material do detector.

A sua **conversão** depende de cada **tipo** de detector.

► Nos detectores gasosos (Ex.: **Geiger-Müller**) os electrões de ionização formam directamente o **impulso eléctrico** que será tratado pela electrónica associada.

► Nos detectores de cintilação (Ex.: **plásticos**) tanto a excitação como a ionização contribuem para induzir transições moleculares de que resulta **emissão de luz**.

► Em emulsões fotográficas a ionização induz reacções químicas que permitem visualizar a **trajectória** da partícula.

### • Sensibilidade

É a capacidade de os detectores gerarem um sinal utilizável para um **dado tipo** de radiação

e uma dada energia. Nenhum detector é sensível a todos os tipos de radiação e a todas as energias incidentes.

A sensibilidade dum detector depende de:

- secção eficaz para produção de ionizações.
- massa
- ruído electrónico
- material de protecção do seu volume activo.

► As partículas carregadas sendo altamente ionizantes, baixa densidade e pequeno volume podem bastar para um detector (Ex.: detectores de  $\alpha$  e  $\beta$  —  $1\text{ cm}^2$  de área transversa e profundidade entre  $\mu\text{m}$  e  $\text{mm}$ )

As partículas neutras devem primeiro interagir no material para produzir partículas carregadas capazes de ionizar o meio. Como essas secções eficazes são mais baixas, os detectores devem ter maiores volumes (Ex.: detectores de  $\gamma$  — diâmetro e profundidade de alguns  $\text{cm}$ ).

► A ionização produzida deve induzir um sinal maior que o do ruído electrónico do detector e cadeia de amplificação.

► A janela de entrada do detector causa absorção da radiação  $\Rightarrow$  só energias suficientes podem penetrar e ser detectadas.

## Resposta

Se o detector for suficientemente grande a radiação incidente é completamente absorvida. A ionização produzida, convertida em impulso eléctrico, é integrada no tempo. Esta carga eléctrica é proporcional à energia incidente.

Se a forma dos sinais não variar de evento para evento, a carga colectada é também proporcional à amplitude de cada impulso.

Esta relação amplitude  $\langle \rangle$  energia é a resposta do detector.

Em muitos casos a resposta do detector é linear, ou seja, a relação entre a quantidade medida  $\bar{Z}$  e a quantidade inicial  $Z$  é do tipo  $\bar{Z} = KZ$ , em que  $K$  é uma constante de calibração. Se  $K$  varia com  $Z$ , chama-se não-linearidade à sua variação relativa:  $\frac{dK}{dZ} / \frac{K}{Z}$ .

## Resolução em energia

É uma medida da capacidade do detector em distinguir dois valores de energia próximos.

Como as excitações e ionizações produzidas são fenómenos estatísticos, flutuam

em torno de valores médios, geralmente de forma gaussiana.

Assim, define-se resolução em energia  $R$  (de forma relativa) em termos da largura a meia altura (FWHM) do pico de energia  $E$ .

$$R \equiv \frac{\Delta E}{E} \approx \frac{\text{FWHM}}{E}$$

Ex.: Detector de NaI, para raios  $\gamma$  de  $\sim 1 \text{ MeV}$

$$R = 8-9\%$$

→ ver fig.

### • Variação da resolução com a energia:

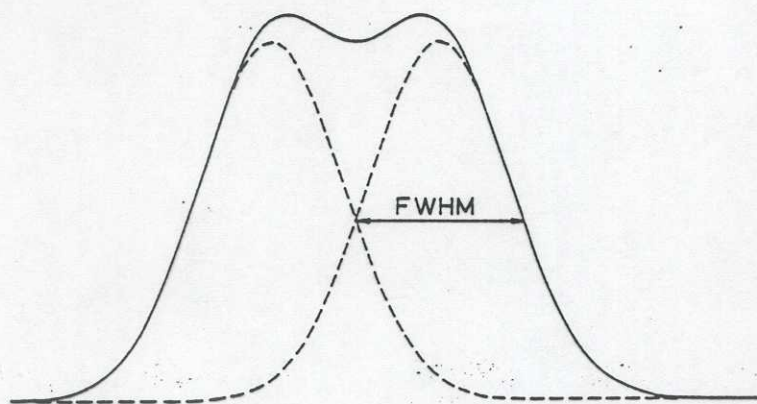
Como o processo de ionização segue a estatística de Poisson, existe uma energia média  $w$  para que seja produzida. Então, uma radiação de energia  $E$  produz, em média,  $J = E/w$  ionizações. Quando  $E$  aumenta, o nº médio de ionizações também aumenta  $\Rightarrow$  flutuações relativas diminuem:

► No caso mais simples, em que  $E$  não é totalmente absorvida, a estatística é verdadeiramente de Poisson (eventos independentes, não há relação de restrição) e tem-se:

$$\sigma^2 = J \Rightarrow R \equiv \frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta J}{J} = \frac{2.35 \sigma}{J} = \frac{2.35}{\sqrt{J}} = 2.35 \sqrt{\frac{w}{E}}$$

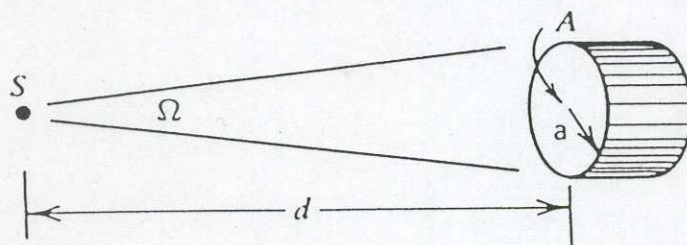
$$\Rightarrow R \text{ varia com } 1/\sqrt{E}$$

Resolução de 2 picos em energia:



FWHM dos 2 picos "tocam-se".

Eficiência geométrica ou aceitância de um detector:



- Outros factores contribuem para a resolução global do detector: as flutuações na deriva dos electrões/iões para os eléctrodos, o ruído electrónico, etc.. São geralmente independentes e de distrib. gaussiana, donde:

$$(\Delta E)^2 = (\Delta E)_{\text{detector}}^2 + (\Delta E)_{\text{electr.}}^2 + \dots$$

## • Eficiência

A eficiência total é dada por:

$$\epsilon_{\text{tot}} = \frac{\text{eventos detectados}}{\text{eventos emitidos p/ fonte}} \cdot$$

Pode ser factorizada em 2 componentes

$$\epsilon_{\text{tot}} = \epsilon_{\text{int}} \cdot \epsilon_{\text{geom}}, \text{ tais que:}$$

- Eficiência intrínseca:

$$\epsilon_{\text{int}} = \frac{\text{eventos detectados}}{\text{eventos incidindo no detector}}$$

- Eficiência geométrica ou aceitância:

$$\epsilon_{\text{geom}} = \frac{\text{eventos incidindo no detector}}{\text{eventos emitidos p/ fonte}} \cdot$$

→ ver fig.

A eficiência intrínseca depende das secções eficazes de interacção. Logo, depende do tipo de radiação incidente e da sua energia, bem como do material do detector e seu volume (especialmente para incidentes neutros).

A **aceitação** depende da configuração geométrica do detector (fração do **ângulo sólido** total que o detector define, visto da fonte), bem como da **distribuição angular** da radiação emitida. Em casos complexos, técnicas de **simulação Monte-Carlo** são usadas.

### • Tempo morto

É o tempo  **$\tau$**  necessário ao detector (e electrónica associada) para processar um evento. O detector pode, ou não, manter-se **activo** durante o período  **$\tau$** :

- Se se mantém activo, um 2º evento que apareça em  **$\tau$**  virá "**empilhar-se**" com o 1º, distorcendo a forma do sinal e levando à perda de informação relativa aos dois.

- Se o detector se bloqueia, quaisquer outros eventos que surjam na janela  **$\tau$**  perdem-se.

- Determinemos, neste 2º caso, mais simples e usual, a **verdadeira taxa de contagem  $m$** , quando o detector regista  **$K$**  **contagens** num tempo  **$T$** , i.e., quando a taxa medida é  **$K/T$** .

Cada contagem gera um tempo morto  $\tau$ . Logo, as  $K$  contagens geram um tempo morto total  $K\tau$  no intervalo  $T$ . Portanto, em  $T$  perdem-se  $m(K\tau)$  contagens.

O número de contagens em  $T$  é então na realidade:

$$mT = K + mK\tau$$

ou:

$$m = \frac{K}{T - K\tau} = \frac{K/T}{1 - K/T \cdot \tau}$$

Se não houver tempo morto:

$$\tau = 0 \Rightarrow m = K/T$$

# Tipos de detectores

## • Detectores de ionização

Devido à grande mobilidade de electrões e iões, os gases são o meio mais simples para a recolha da ionização proveniente da radiação incidente.

Os diferentes detectores de ionização, câmara de ionização, contador proporcional, contador Geiger-Müller, são basicamente um só dispositivo que pode trabalhar em diversos regimes de tensão aplicada aos seus terminais, explorando diferentes fenómenos.

Esse dispositivo consiste num cilindro de paredes condutoras (cátodo), cheio de um gás nobre (Ex.: argon), tendo ao longo do eixo um fio condutor (ânodo) de tensão  $+V_0$  em relação às paredes, que estão ao potencial nulo.

O campo eléctrico é radial: → ver fig.

$$E = \frac{1}{r} \frac{V_0}{\ln r_{\text{ext}}/r_{\text{int}}}$$

Quando uma radiação atravessa o cilindro, um certo número de pares electrão-ião (em média  $1/30 \text{ eV}$ ) proporcional à energia depositada é criado. Devido ao campo eléctrico, os iões

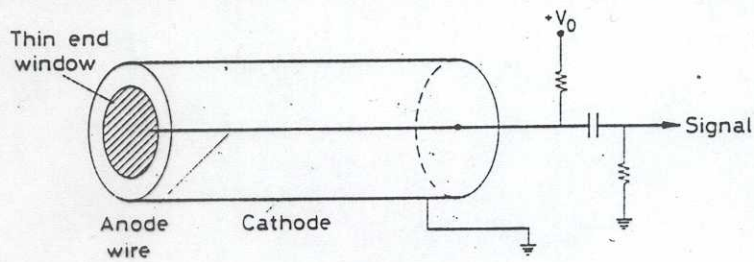
são acelerados para o **cátodo** e os **electrões** para o **ânodo**, onde se convertem num **impulso de corrente** que, por integração, dá a **carga recolhida**. Esta depende, pois, de  $V_0$ : → ver fig.

► **Região I**: Se  $V_0 \sim 0$ , os pares e- ião **recombinam-se** devido à sua própria **atracção eléctrica**  $\Rightarrow$  **não há carga recolhida**.

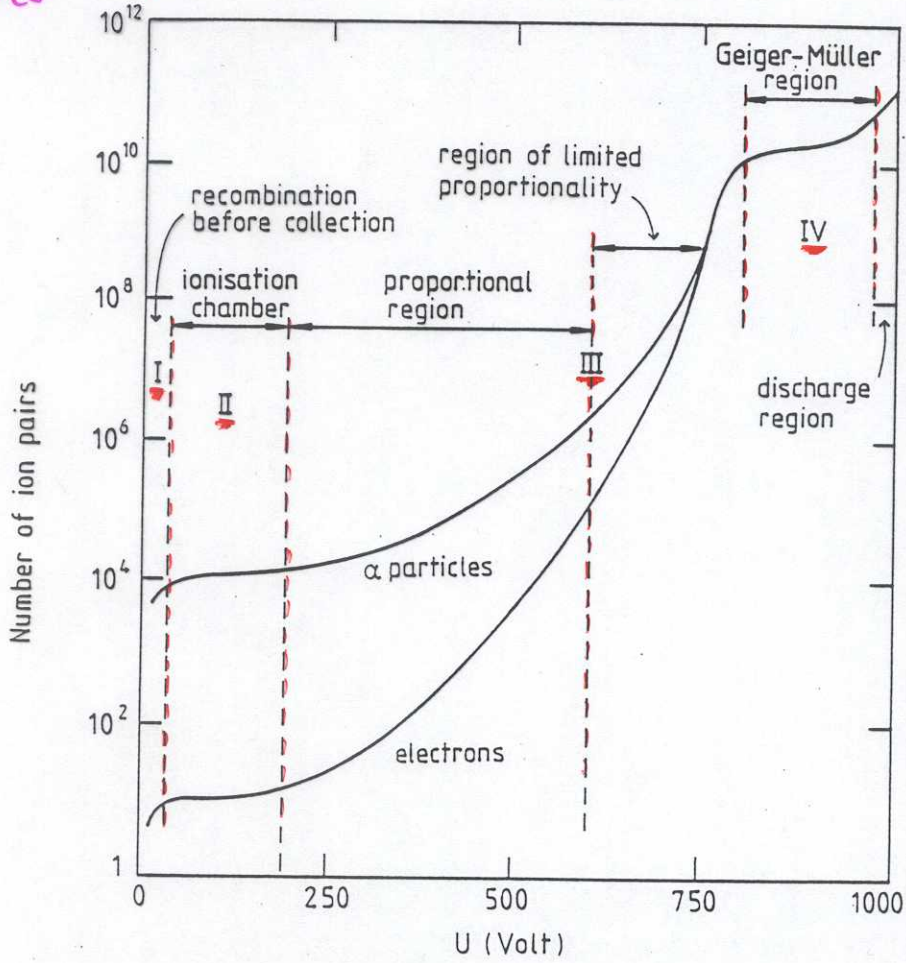
► **Região II**: À medida que  $V_0$  aumenta, cada vez mais pares são recolhidos antes que se possam recombinar. A partir de certo valor, **todos** os pares formados são recolhidos e um novo aumento de  $V_0$  **não produz efeito**: estamos no **1º patamar** — **região de trabalho da câmara de ionização**.

► **Região III**: Continuando a aumentar  $V_0$ , o campo eléctrico torna-se suficientemente forte para acelerar os **electrões libertados** a energias capazes de produzir **ionizações secundárias**. Os **electrões libertados** nestas poderão produzir **novas ionizações**  $\Rightarrow$  dá-se a **ionização em avalanche**.

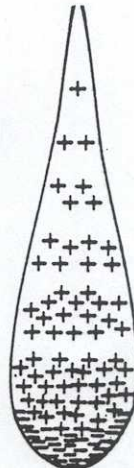
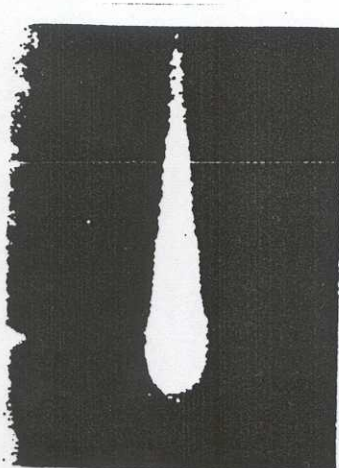
O campo eléctrico só é muito forte junto ao **ânodo**, pelo que a avalanche se produz aí, sob a forma de uma **gota** de cargas positivas e negativas migrando a velocidades diferentes ( $v_e \sim 10^3 v_{ião}$ ) e em sentidos opostos. → ver fig.



paires de ions ↑



$V_0(V)$



O sinal de corrente produzido é proporcional à ionização primária, com uma amplificação da ordem de  $10^4 - 10^6$  — é a região de trabalho do contador proporcional.

Na parte final de III a proporcionalidade começa a perder-se devido ao aumento excessivo de carga espacial, o que distorce o campo eléctrico em redor do ânodo: é a sub-região de proporcionalidade limitada.

► Região IV: Tornando a subir  $V_0$  ocorre uma descarga no gás: em vez de uma só avalanche localizada dão-se muitas avalanches ao longo do fio, devido a fotões de desexcitação moleculares que vão iniciar o processo de ionização com multiplicação noutra local. O sinal em corrente satura, sendo apenas controlado pela capacidade  $C$  do contador ( $Q = CV_0$ ) — é a região de ruptura ou de Geiger-Müller.

► Região V: não se trata de uma região de trabalho dado haver ruptura contínua com ou sem radiação incidente.

## • Detectores de cintilação

Certos materiais, quando bombardeados com partículas carregadas ou radiações, emitem pequenos flashes de luz, isto é, cintilam.

Acoplados a um dispositivo de amplificação (como o fotomultiplicador - PM) as cintilações são convertidas em impulsos eléctricos que são tratados pela cadeia electrónica associada.

As suas mais importantes características gerais são:

- **Sensibilidade**: acima de um limiar em energia, muitos cintiladores exibem uma resposta quase linear à energia incidente  
⇒ bons como espectrómetros de energia.
- **Resposta em tempo**: são rápidos, pois têm tempos de resposta e de recuperação muito pequenos (comparados com outros tipos de detectores)  
⇒ bons para altas taxas de contagem, mantendo um tempo morto reduzido.  
⇒ bons para definição em tempo dos eventos.

Os materiais cintiladores são luminescentes, isto é, quando sujeitos à luz, calor, radiação, etc, absorvem a energia e reemitem-na sob a forma de luz visível.

- Se a reemissão ocorre imediatamente ( $\sim 10\text{ ns}$ ), tempo típico das transições atômicas, dá-se a **fluorescência**.
- Se a reemissão for atrasada (alguns  $\mu\text{s}$  a horas) por criação de estados excitados **metastáveis**, dá-se a **fosforescência**.

Em muitos cintiladores há 2 componentes de reemissão, a **rápida** e a **lenta**, sendo a 1ª geralmente dominante.

Nem todos os materiais cintiladores servem para detectores. Os requisitos são:

- **grande eficiência** na conversão da energia em radiação **fluorescente**.
- **transparência** à radiação fluorescente para boa transmissão da luz ao fotocátodo do PM.
- emissão numa **região espectral** adequada à do material do fotocátodo do PM.
- uma componente rápida de reemissão de **pequena constante de decaimento**.

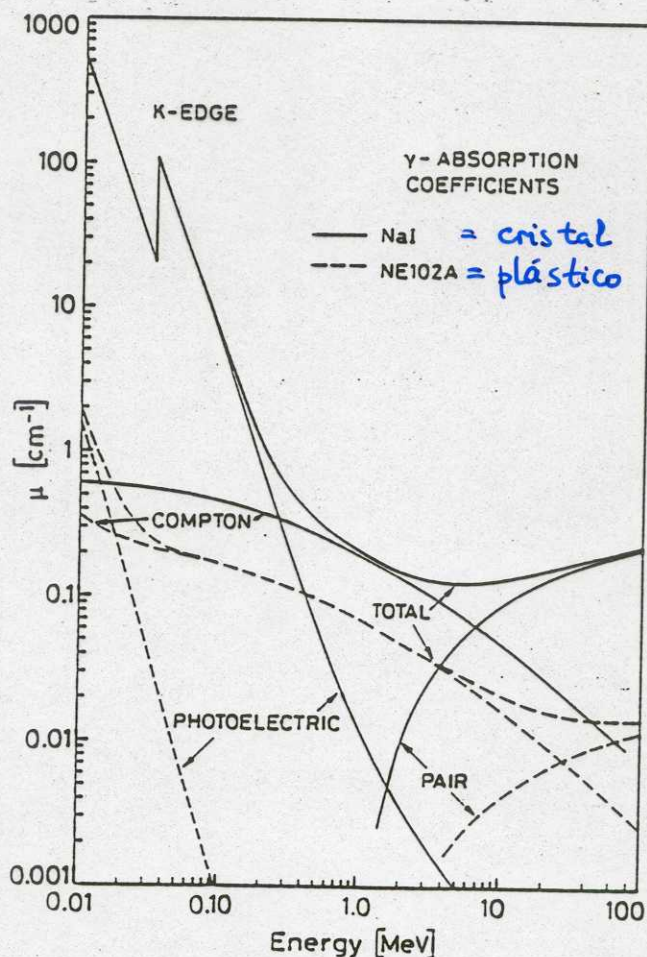
Os tipos de cintiladores usados são: **cristais e líquidos orgânicos, plásticos, cristais inorgânicos, gases e vidros**.

A título de exemplo, tabelam-se as diferenças entre plásticos e cristais **inorgânicos**.

→ ver figs.

## Deteccão de $\gamma$ :

Comparação dos coeficientes de absorção linear entre um plástico (NE102A) e um cristal inorgânico (NaI)



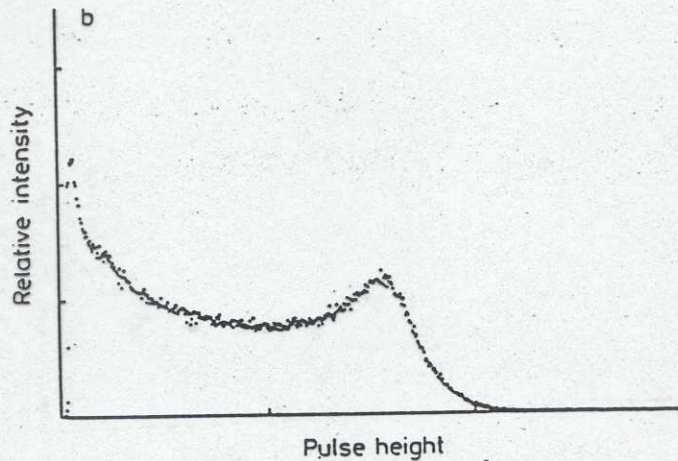
Comportamento típico das secções eficazes:

$$\sigma_{\text{fotoeléctrico}} \propto Z^5$$

$$\sigma_{\text{Compton}} \propto Z$$

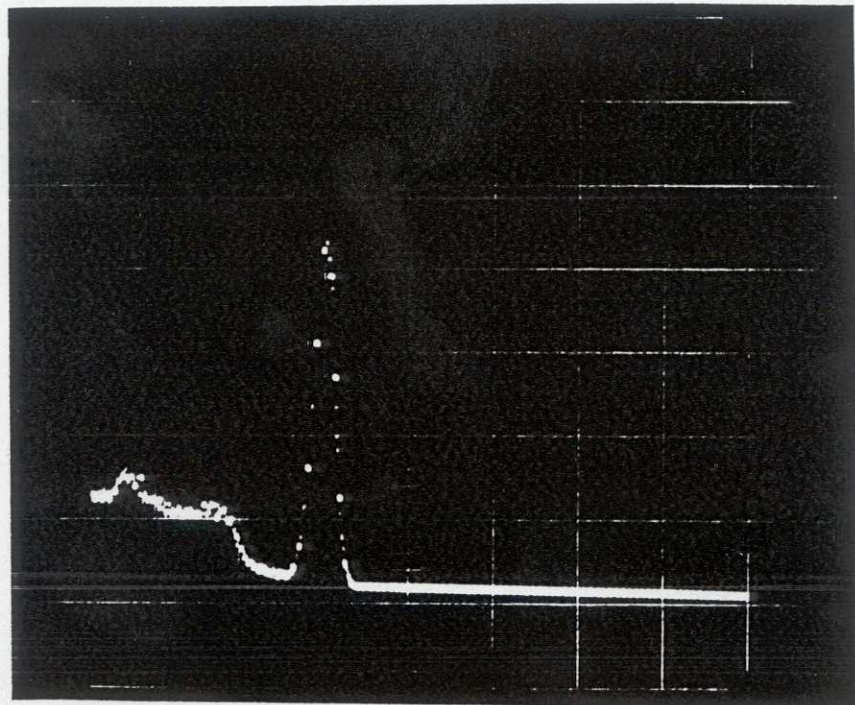
$$\sigma_{\text{prod. pares}} \propto Z^2$$

# Detecção de $\gamma$ :



Plásticos:

Baixo  $Z \Rightarrow$  Má eficiência de recolha do sinal  
Pouca cintilação  $\Rightarrow$  Má resolução dos picos e distribuições



Cristais:

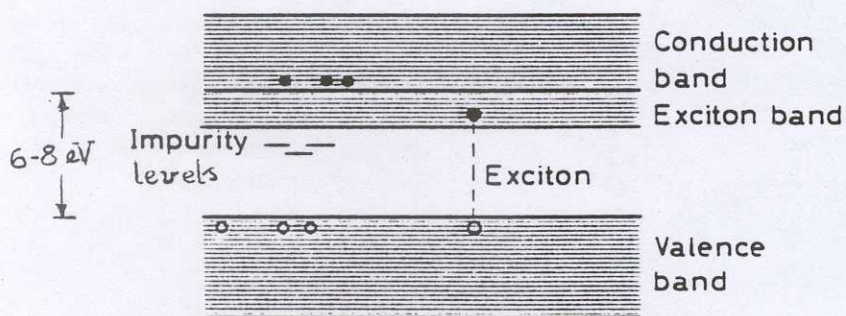
Alto  $Z \Rightarrow$  Boa eficiência na recolha da energia do  $\gamma$   
Muita cintilação  $\Rightarrow$  Boa resolução

|                               | plásticos   | cristais inorg. | Consequências                                                |
|-------------------------------|-------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|
| Z                             | baixo       | alto            | plásticos bons para $e^-$<br>cristais bons para $\gamma$     |
| Índice de refração            | $\sim 1.58$ | $\sim 1.78$     | boas transparências                                          |
| luz reemitida                 | 1           | 1-10            | cristais: boa resolução em energia<br>$\text{NaI(Tl)} = 2.3$ |
| comp. rápida (const. decaim.) | 2-4 ms      | 60-1000 ms      | $\text{NaI(Tl)} = 230 \text{ ns}$                            |
| compr. onda (máxima emissão)  | 370-430 nm  | 300-450 nm      | $\text{NaI(Tl)} = 413 \text{ nm}$                            |
| material higroscópico         | não         | sim (em geral)  | $\text{NaI(Tl)}$ sim<br>BGO não                              |

### • Cristais inorgânicos :

Os cintiladores inorgânicos são frequentemente **cristais dopados** com uma pequena quantidade de **impurezas activadoras**. O mais usado é o  $\text{NaI(Tl)}$ .

Enquanto a cintilação dos materiais orgânicos é de origem **molecular**, nos cintiladores inorgânicos é devida à estrutura de **bandas**



**Fig. 7.7.** Electronic band structure of inorganic crystals. Besides the formation of free electrons and holes, loosely coupled electron-hole pairs known as excitons are formed. Excitons can migrate through the crystal and be captured by impurity centers

electrónicas dos cristais.

Dois processos podem ocorrer quando um cristal é bombardeado por radiação:

→ ver fig.

- Ou ioniza o cristal removendo um electrão da banda de valência para a de condução, criando um electrão livre e um buraco livre.

- Ou cria um par electrão-buraco ligado (excitação) que pode mover-se livremente no cristal, mas como um todo.

Estes pares, ao encontrarem um átomo da substância activadora, excitam-no. É da sua desexcitação que resulta a emissão de luz na banda necessária à excitação do fotocátodo dos PMs.

### Fotomultiplicador (PM)

→ ver fig.

É um tubo de vidro, sob vácuo, constituído por um fotocátodo que recebe os impulsos luminosos do cintilador e liberta electrões por efeito fotoeléctrico, e por um sistema de multiplicação formado por um conjunto de eléctrodos (10 a 14), os díndos, que termina num ânodo, onde se recolhe o sinal.

- O fotocátodo é uma liga semicondutora formada por um ou mais metais alcalinos

(Na, K, Cs) e materiais do grupo V (geralmente Sb).

A propriedade básica dum fotocátodo é a sua **eficiência quântica**: número de electrões libertados por fóton incidente. Os fotocátodos **bi alcalinos** atingem máximos de  $\eta = 27\%$  para comprimentos de onda  $\lambda = 380 \text{ nm}$ .  
→ ver fig.

► Diferentes configurações geométricas podem ser usadas para **colectar, focar e acelerar** os electrões para o 1º dínodo.

Os dínodos são eléctrodos feitos de metal revestido por um material com **alto coeficiente de emissão electrónica secundária** (Exºs: Ag-Mg, Cu-Be, Sb-Cs). Um electrão de **100 - 200 eV** arranca **3 a 5** electrões secundários. Com **14** dínodos e **diferenças de potencial entre andares de 100 - 150 V**, obtém-se um **ganho de  $10^8$** .  
→ ver fig.

► O ruído dum PM tem **2** componentes:

- **Corrente negra**, presente mesmo quando o PM não é iluminado, devida essencialmente à **emissão termiônica** do cátodo e dínodos

$$I = A T^2 \exp(-e\phi / kT)$$

- **ruído estatístico**, devido às flutuações em torno do valor médio da **emissão fotoelétrica** do cátodo e das **emissões secundárias** de cada dínodo.

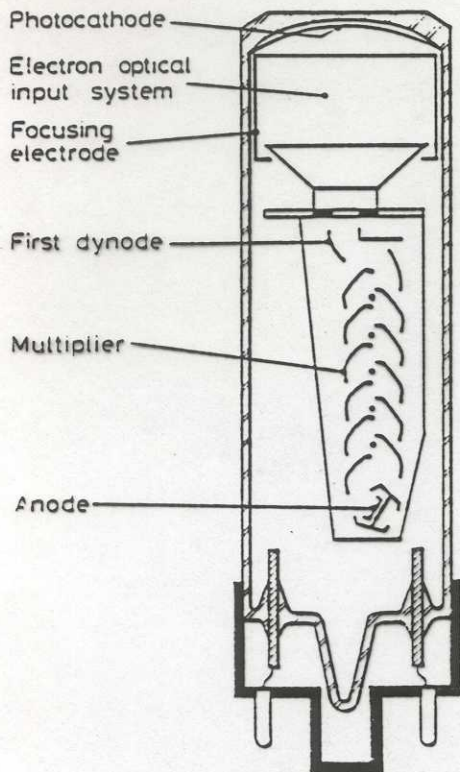


Fig. 8.1. Schematic diagram of a photomultiplier tube (from Schonkeren [9.1])

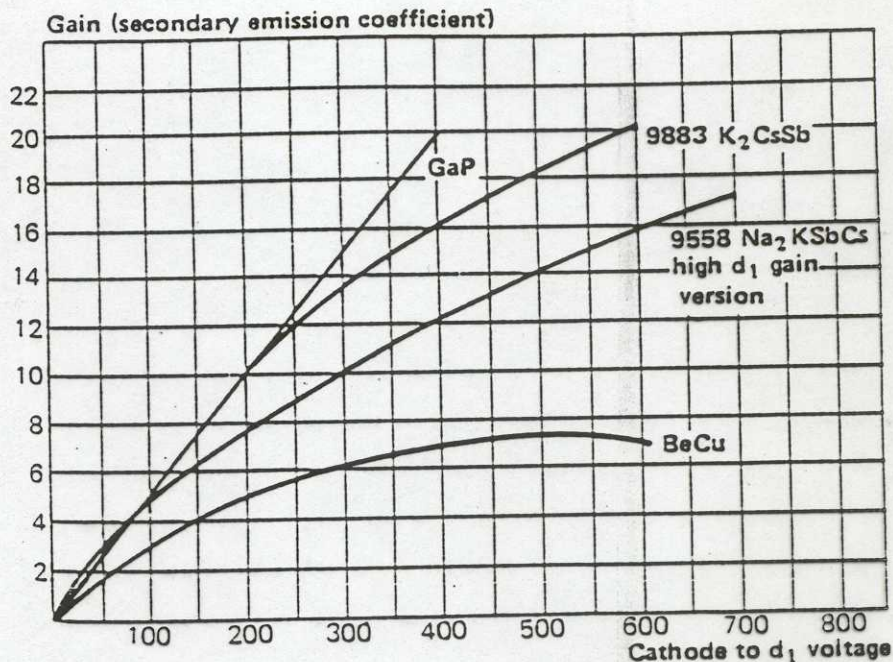


Fig. 8.9. Secondary emission factor for several dynode materials (from EMI Catalog [8.2])

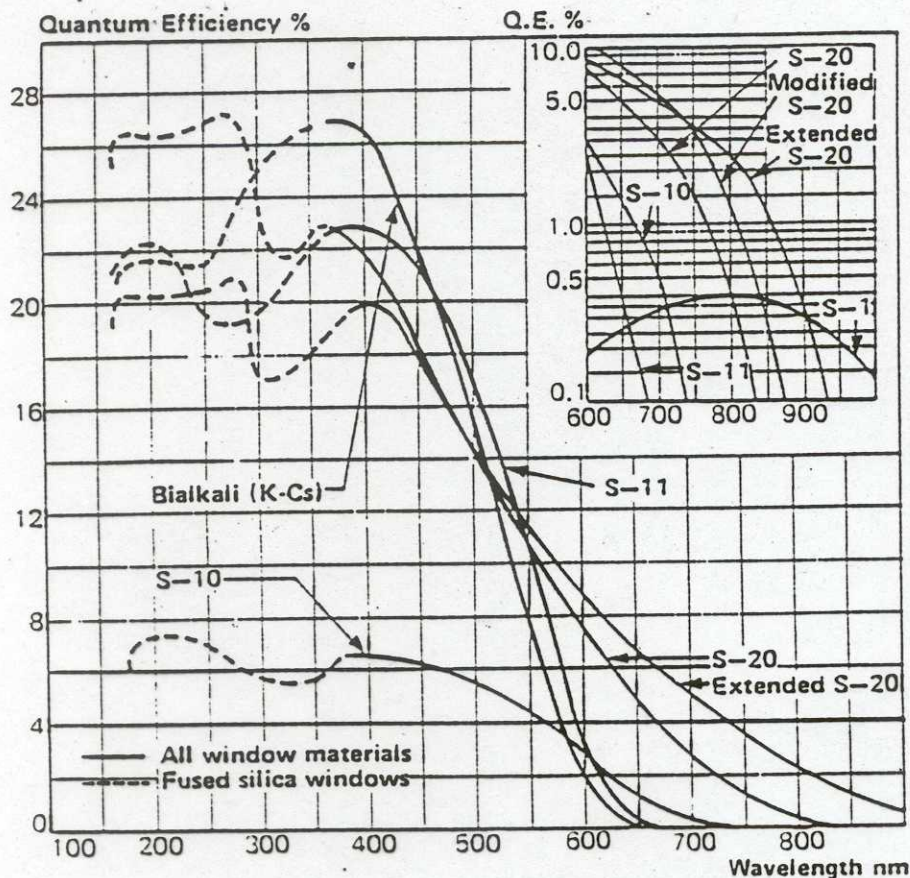


Fig. 8.2. Quantum efficiency of various photocathode materials (from EMI Catalog [8.2])

## • Detectores semicondutores

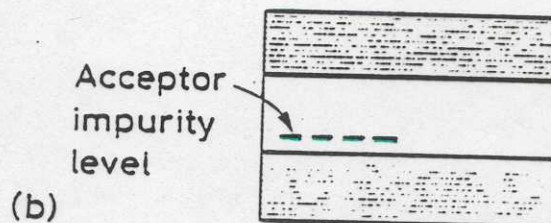
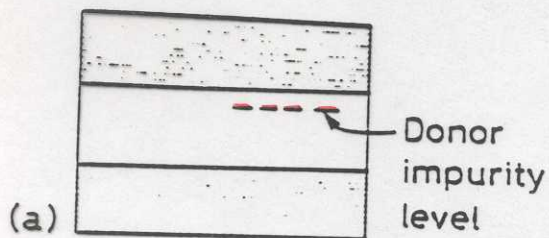
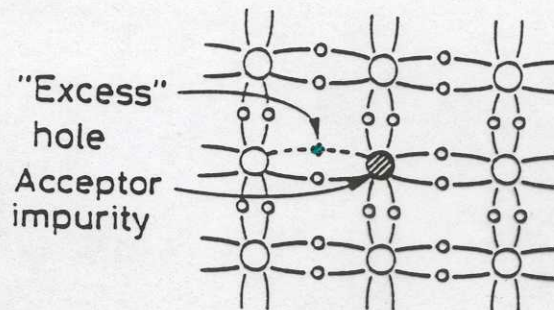
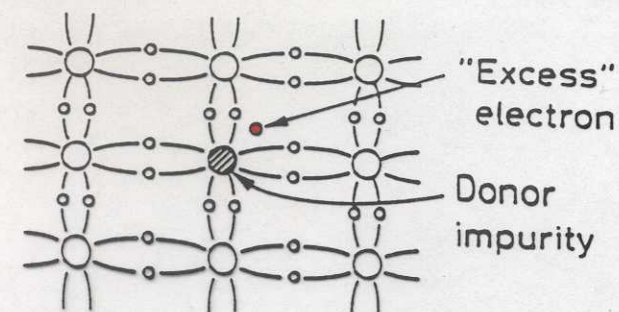
### • semicondutores de tipo p e n:

Se se substitui um átomo da rede cristalina de um semicondutor por uma impureza com 5 electrões de valência (+1 que o semicondutor) cria-se um semicondutor extrínseco ou dopado de tipo  $n$ , ou dador de electrões, com um nível de energia da impureza muito perto da banda de condução —  $0,05 \text{ eV}$  para o silício (Ex.: arsénio). → ver fig.

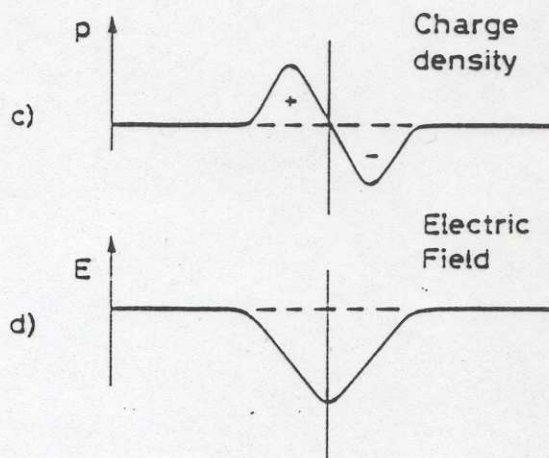
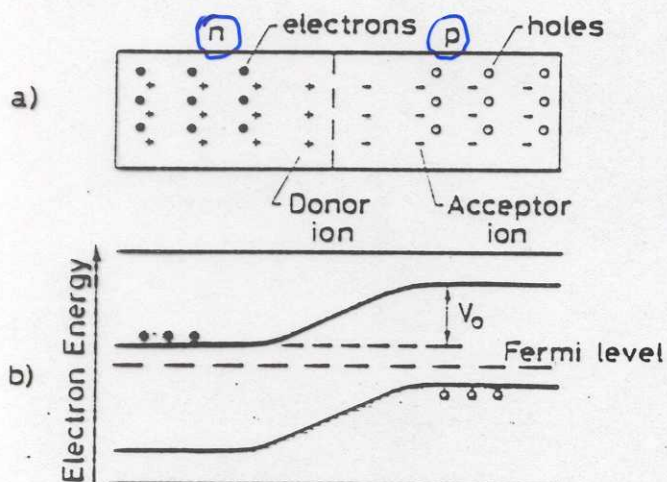
Se se injectam impurezas com 3 electrões de valência cria-se um semicondutor de tipo  $p$ , ou aceitador de electrões, com o nível adicional de energia muito perto da banda de valência (Ex.: gálio).

### • Junção p n:

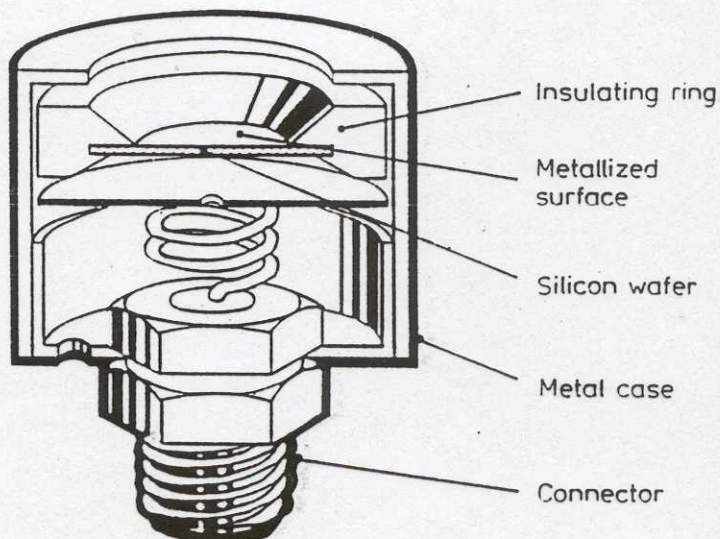
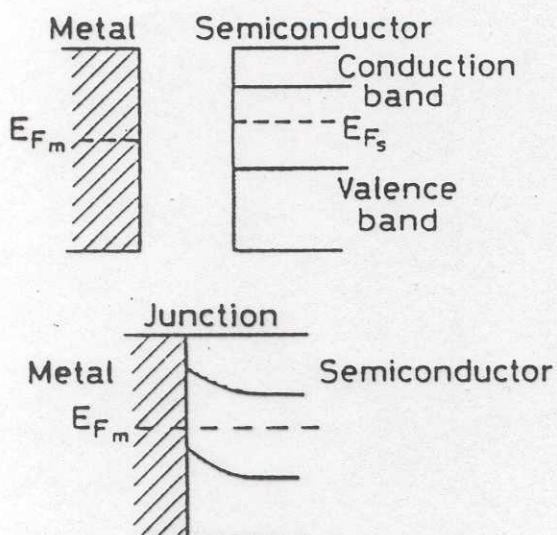
Quando se juntam dois semicondutores extrínsecos de tipos diferentes,  $p$  e  $n$ , na zona de contacto há difusão de electrões para o lado  $p$  e difusão de buracos para o lado  $n$ . Estas difusões são impôr recombinações electrão-buraco nas duas regiões. Mas como os materiais eram inicialmente neutros, criam-se cargas eléctricas dum lado e do outro da



**Fig. 10.4.** (a) Addition of donor impurities to form n-type semiconductor materials. The impurities add excess electrons to the crystal and create donor impurity levels in the energy gap. (b) Addition of acceptor impurities to create p-type material. Acceptor impurities create an excess of holes and impurity levels close to the valence band



**Fig. 10.5.** (a) Schematic diagram of an np junction, (b) diagram of electron energy levels showing creation of a contact potential  $V_0$ , (c) charge density, (d) electric field intensity



**Fig. 10.11**

**Fig. 10.12**

junção:

- A região p, invadida por electrões torna-se negativa.

- A região n, devido aos buracos torna-se positiva.

→ ver fig.

Quer dizer, cria-se um potencial de contacto na junção, que vai impedir a migração de mais portadores de carga: repele os electrões para a zona n e os buracos para a p. Cria-se uma região livre de portadores de carga em movimento: é a zona de depleção ou de ausência de carga espacial. Qualquer electrão ou buraco entrando nesta zona é varrido dela.

⇒ é uma propriedade interessante para detectores. A radiação, ao entrar na zona de depleção, cria pares e-buraco ( $3.6 \text{ eV} / \text{par}$ ) que são varridos para os lados, onde contactos eléctricos em cada extremo da junção recolhem um sinal de corrente proporcional à energia da radiação incidente.

► Os detectores de barreira de superfície são detectores de junção formada entre semicondutor e metal. Geralmente são

de Si-tipo n e ouro ou de Si-tipo p e alumínio.

Devido aos diferentes níveis de Fermi entre estes materiais, quando em contacto as bandas do semiconductor baixam, formando-se também uma zona de depleção com as mesmas propriedades da junção p n . → ver fig.