

Técnicas Experimentais

Detectores de Radiação

Prof. Altem Nascimento Pontes

Período: 18 a 24 de Janeiro de 2010

Princípios de Operação dos Detectores de Radiação

Detectores de radiação

- Detector de radiação é um dispositivo que, colocado em um meio onde exista um campo de radiação, seja capaz de indicar a sua presença.
- Existem diversos processos pelos quais diferentes radiações podem interagir com o meio material utilizado para medir ou indicar características dessas radiações.
- Entre esses processos os mais utilizados são os que envolvem a geração de cargas elétricas, a geração de luz, a sensibilização de películas fotográficas, a criação de traços (buracos) no material, a geração de calor e alterações da dinâmica de certos processos químicos.
- Normalmente um detector de radiação é constituído de um elemento ou material sensível à radiação e um sistema que transforma esses efeitos em um valor relacionado a uma grandeza de medição dessa radiação.

Propriedades de um detector

Para que um dispositivo seja classificado como um detector apropriado é necessário que, além de ser adequado para a medição do mensurando, apresente nas suas sequências de medição algumas características, tais como:

- **Repetitividade**, *definida pelo grau de concordância dos resultados obtidos sob as mesmas condições de medição;*
- **Reprodutibilidade**, *grau de concordância dos resultados obtidos em diferentes condições de medição;*
- **Estabilidade**, *aptidão do instrumento conservar constantes suas características de medição ao longo do tempo;*
- **Exatidão**, *grau de concordância dos resultados com o “valor verdadeiro” ou “valor de referência” a ser determinado;*
- **Precisão**, *grau de concordância dos resultados entre si, normalmente expresso pelo desvio padrão em relação à média;*
- **Sensibilidade**, *razão entre a variação da resposta de um instrumento e a correspondente variação do estímulo;*
- **Eficiência**, *capacidade de converter em sinais de medição os estímulos recebidos.*

Eficiência de um detector

- A eficiência de um detector está associada normalmente ao tipo e à energia da radiação e é basicamente a capacidade do detector de registrá-la.
- A eficiência de um detector pode ser definida de duas formas: **eficiência intrínseca e eficiência absoluta.**
- *O registro de cada radiação* no detector representa um sinal, que pode ser um pulso, um buraco, um sinal de luz, ou outro sinal qualquer, dependente da forma pela qual a radiação interage com o detector e dos subprodutos mensuráveis gerados.

Eficiência intrínseca do detector

- O tipo e a energia de radiação, normalmente, são fatores ligados às características intrínsecas do detector. A eficiência intrínseca pode ser escrita como:

$$\varepsilon_{intr} = \frac{\text{número de sinais registrados}}{\text{número de radiações incidentes no detector}}$$

Eficiência absoluta de um detector

- A eficiência absoluta está relacionada não só com as suas características de construção, mas também com a fonte de radiação que está sendo medida, com o meio e com a geometria de medição. Pode ser escrita como:

$$\epsilon_{abs} = \frac{\text{número de sinais registrados}}{\text{número de radiações emitidas pela fonte}}$$

Fatores que definem a escolha de detectores

Tipo da radiação

Como as radiações interagem de forma diferente com a matéria, dependendo de seu tipo (**radiação eletromagnética, partículas carregadas leves, partículas carregadas pesadas, nêutrons**), a escolha do detector depende do tipo de radiação que se quer medir.

Em geral, um detector que mede com grande eficiência um determinado tipo de radiação (por exemplo, fótons de alta energia) pode ser totalmente inadequado para medir outro tipo (por exemplo, radiação alfa).

Fatores que definem a escolha de detectores

Intervalo de tempo de interesse

- Em alguns casos, o objetivo pode ser a **medição "instantânea" da radiação**, isto é, o número médio de radiações em um intervalo de tempo muito curto, por exemplo, ao se avaliar a radiação num local antes de realizar uma ação qualquer.
- Em outros, se deseja registrar **a radiação acumulada durante um período de tempo**, como por exemplo, o período durante o qual foi exposto um trabalhador. Para cada finalidade deve ser utilizado um detector apropriado.
- No primeiro caso, são utilizados os *detectores de leitura direta, ou ativos, tais como os detectores à gas para medição da taxa de dose, os cintilômetros, os detectores a semicondutor.*
- No segundo caso estão incluídos **os detectores passivos, que registram os eventos e podem** ser processados posteriormente, como as emulsões fotográficas, os detectores de traço, **os dosímetros termoluminescentes, lioluminescentes e citogenéticos.**

Fatores que definem a escolha de detectores

Precisão, exatidão, resolução

- Dependendo da utilização, a escolha do detector e do método de medição pode variar em relação ao grau de precisão, exatidão e resolução dos resultados desejados. Isto está ligado às diversas *incertezas envolvidas no processo de medição e nas outras atividades relacionadas*.
- *Para* medições ambientais resultados com incertezas de 20% podem ser considerados aceitáveis enquanto que, para trabalhos de produção de padrões de medições de atividade, uma incerteza de 0,5% pode ser considerada muito grande.

Fatores que definem a escolha de detectores

Condições de trabalho do detector

- O detector utilizado em *trabalho de campo* tem que ter condições de *robustez*, portabilidade e autonomia diferentes das necessárias aos detectores operados em ambientes controlados de laboratório.
- Em situações extremas de ambiente, como por exemplo dentro do **circuito primário de um reator**, somente detectores especiais têm condições de operar.
- Essas condições de operação do detector irão muitas vezes determinar os materiais utilizados em sua construção.
- Detectores muito sensíveis a choques mecânicos não são recomendados para medições em unidades móveis.

Fatores que definem a escolha de detectores

Tipo de informação desejada

- Conforme a finalidade, pode-se desejar somente informações sobre o número de contagens, ou energia da radiação detectada.
- Em alguns casos se busca a relação com a dose absorvida, tempo vivo de medição, distribuição em energia.
- O processamento dessa informação depende do detector escolhido e do mecanismo pelo qual a informação é coletada.

Fatores que definem a escolha de detectores

Características operacionais e custo

- Outros fatores determinantes na escolha do detector são a facilidade de operação, facilidade e disponibilidade de manutenção e, finalmente, o custo do detector.

Especificações para monitores, dosímetros e sistemas de calibração

- Os detectores necessitam obedecer a certos requisitos, para serem padronizados para o uso em Proteção Radiológica e em Metrologia das radiações ionizantes.
- Assim, além de possuir as características citadas, **devem satisfazer a requisitos normativos**, conforme será descrito a seguir.

Especificações para monitores, dosímetros e sistemas de calibração

Monitor de radiação

- É um detector construído e adaptado para radiações e finalidades específicas e deve apresentar as seguintes propriedades, regidas por normas da IEC 731 ou ISO 4037-1:

limite de detecção adequado;

precisão e exatidão;

reprodutibilidade e repetitividade;

linearidade;

estabilidade a curto e longo prazo;

baixa dependência energética;

baixa dependência direcional, rotacional;

baixa dependência dos fatores ambientais;

baixa dependência com a taxa de exposição.

Especificações para monitores, dosímetros e sistemas de calibração

Dosímetro

- É um monitor que mede uma grandeza radiológica ou operacional, mas com resultados relacionados ao corpo inteiro, órgão ou tecido humano. Além das propriedades de um monitor, ele deve ter:
 - resultados em dose absorvida ou dose equivalente (ou taxa);
 - ser construído com material tecido-equivalente;
 - possuir fator de calibração bem estabelecido;
 - suas leituras e calibrações são rastreadas a um laboratório nacional e à rede do BIPM;
 - incertezas bem estabelecidas e adequadas para sua aplicação;
 - modelo adequado para cada aplicação;
 - modelo adequado para cada tipo e intensidade de feixe.

Especificações para monitores, dosímetros e sistemas de calibração

Sistema de Calibração

- Um sistema de calibração é um conjunto de detectores e unidades de processamento que permite medir uma grandeza radiológica de modo absoluto ou relativo e deve cumprir as seguintes exigências:
 - fator de calibração rastreado aos sistemas absolutos e ao Bureau International de Poids et Mesures (BIPM);
 - aprovação em testes de qualidade (comparações interlaboratoriais, protocolos e sistemas já consagrados internacionalmente);
 - incertezas bem estabelecidas e pequenas;
 - resultados, rastreados ao BIPM, e acompanhados de certificados registrados;
 - fatores de influência sob controle;
 - fatores de interferência conhecidos;
 - integrar os sistemas de um laboratório de calibração.

Detecção Utilizando Emulsões Fotográficas

Emulsões fotográficas

As emulsões fotográficas são normalmente constituídas de cristais (grãos) de haletos de prata (normalmente brometo) dispersos em uma matriz de gelatina. Cada grão tem aproximadamente 10^{10} átomos de Ag^+ .

As emulsões fotográficas utilizadas para detecção de radiação são **similares às utilizadas em filmes fotográficos comuns**, sendo que nas primeiras a concentração dos grãos de brometo de prata é várias vezes superior.

A presença da prata metálica remanescente após o processo de revelação está relacionada à quantidade de radiação a que foi submetida a emulsão.

Mecanismo de interação da radiação com as emulsões fotográficas

A ação da radiação na emulsão é semelhante a que ocorre com a da luz visível em chapas fotográficas comuns. **A radiação, ao interagir com elétrons de átomos do brometo de prata faz com que apenas alguns átomos no grão sejam “sensibilizados” pela sua passagem, transformando os íons Ag^+ em Ag metálica.**

Essa quantidade de Ag transformada pode permanecer indefinidamente, armazenando uma *imagem latente da trajetória da partícula na emulsão*. No processo subsequente de revelação, uma solução reveladora tem a propriedade de converter todos os grãos de brometo de prata em prata metálica.

Interação de fótons e nêutrons com a emulsão fotográfica

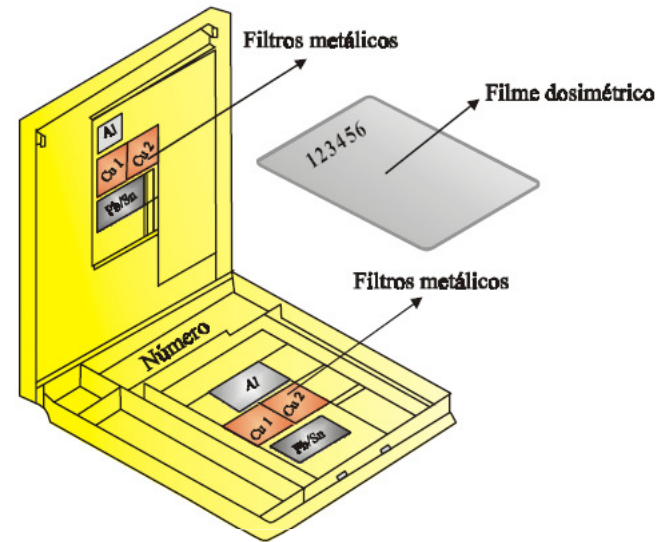
A interação da radiação indiretamente ionizante, como fótons com energia acima da energia da luz visível e nêutrons, tem baixa probabilidade de ocorrência diretamente com os átomos de Ag na emulsão.

Normalmente o que ocorre é uma interação prévia dessas radiações resultando em elétrons secundários ou fótons de energia mais baixa, que por sua vez, têm maior facilidade de sensibilizar a emulsão.

Aplicações da dosimetria com emulsões fotográficas

Monitoração pessoal de radiação X e gama

- Os filmes fotográficos utilizados para monitoração pessoal têm dimensão reduzida, da ordem de alguns centímetros quadrados (por exemplo, 3 cm x 4 cm). São acondicionados em envelopes à prova de luz.
- Para a monitoração, um ou mais filmes são colocados em monitores (ou *badges*), normalmente feitos de plástico, com algumas partes das áreas sensíveis cobertas por filtros de cobre e chumbo.
- Normalmente são colocadas em um monitor dois tipos de emulsão, uma mais sensível e outra menos sensível, para ampliar a capacidade de detecção dos fótons em quantidade e em energia.



Disposição dos filtros metálicos e do filme no monitor individual utilizado pelo IRD

Aplicações da dosimetria com emulsões fotográficas

Uso em raio X diagnóstico

As emulsões fotográficas são utilizadas também para a obtenção de radiografias utilizadas em diagnósticos médicos. Como a atenuação e absorção da radiação com os materiais depende do *Z do material e de sua densidade*, a radiação que atravessa diversos tipos de tecido irá *interagir de forma diferente* com eles, permitindo uma discriminação da composição do interior do corpo examinado por meio do feixe atenuado transmitido, o qual irá formar uma imagem na chapa fotográfica.

Dessa forma é possível verificar fraturas em ossos, que atenuam mais a radiação que o tecido mole; identificar materiais estranhos no corpo, alterações de tecido provocadas por câncer.



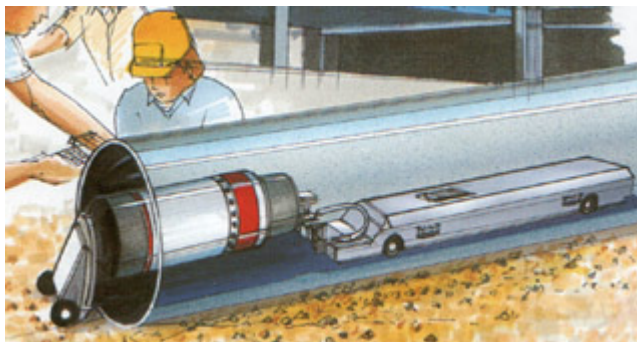
Raios X Digital

Equipamento médico do raio de X do diagnóstico

Aplicações da dosimetria com emulsões fotográficas

Gamagrafia

- De forma semelhante à utilizada para raio X diagnóstico, feixes de raios são usados para avaliação de estruturas na construção civil, na siderurgia e metalurgia.
- A radiação é mais absorvida na matéria mais densa e com mais alto Z e *permite verificar a existência de bolhas e falhas no interior de grandes estruturas metálicas e de concreto*, sem a necessidade de destruí-las.
- Normalmente são utilizadas fontes de ^{60}Co , de ^{137}Cs e de ^{192}Ir . Podem ser utilizados também aparelhos de raios X de alta energia (acima de 400 keV).



**Equipamento
Gamagrafia
Projectores de Gama
usando:
Selénio 75
Iridio 192**



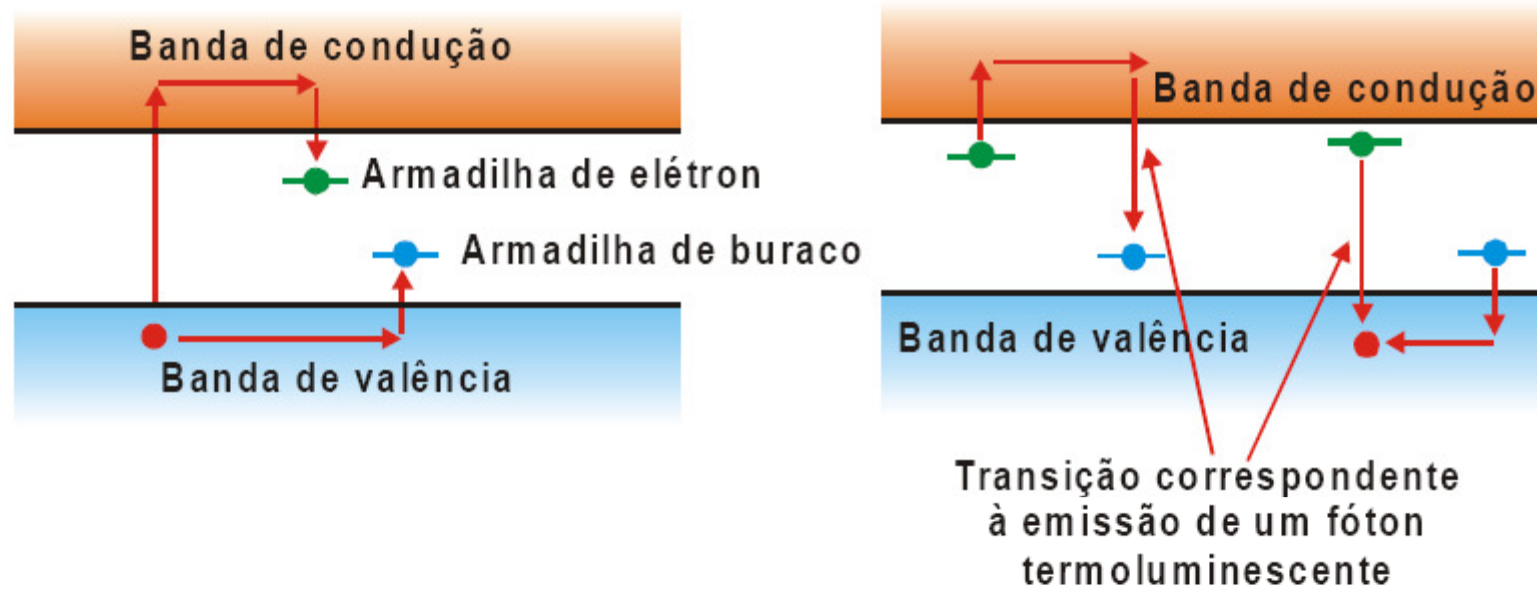
**Equipamento raio x
portáteis**
de: 160Kv; 200Kv; 225Kv;
250Kv; 300Kv; 320Kv
Panorâmicos e direccionais



Detectores Termoluminescentes

O mecanismo da termoluminescência

- O volume sensível de um material termoluminescente consiste de uma massa pequena (de aproximadamente 1 a 100 mg) de um material cristalino dielétrico contendo ativadores convenientes.
- Esses ativadores que podem estar presentes em quantidades extremamente pequenas (da ordem de traço, por exemplo), criam dois tipos de imperfeições na rede cristalina: armadilhas para elétrons, que capturam e aprisionam os portadores de carga e centros de luminescência.
- **A radiação ionizante, ao interagir com os elétrons, cede energia aos mesmos, que são aprisionados pelas armadilhas. Se o material é submetido a um aquecimento os elétrons aprisionados nas armadilhas são liberados, fazendo com que percam a energia nos centros de luminescência.** A diferença de energia entre esses dois níveis é emitida através de um fóton na faixa da luz visível (da ordem de alguns eV).



Emissão de luz na termoluminescência

Utilização na detecção e dosimetria de radiação

- Para alguns materiais as armadilhas resistem bem à temperatura ambiente por períodos de tempo relativamente longos (**maiores que 30 dias, por exemplo**), ou seja, só liberam os elétrons e emitem luz após um tratamento térmico de algumas centenas de graus Celsius.
- Como o sinal luminoso pode ser proporcional à radiação incidente, esses materiais são bastante convenientes para serem utilizados como dosímetros, principalmente pela sua característica de reutilização antes de apresentarem fadiga expressiva.

Principais materiais termoluminescentes

- As principais substâncias utilizadas como materiais termoluminescentes para dosimetria são o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (sulfato de cálcio dopado com disprósio), o $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ (dopado com manganês); o LiF (fluoreto de lítio) e a CaF_2 (fluorita).
- No Brasil, o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (produzido no IPEN/CNEN-SP) e o LiF , são os mais utilizados.

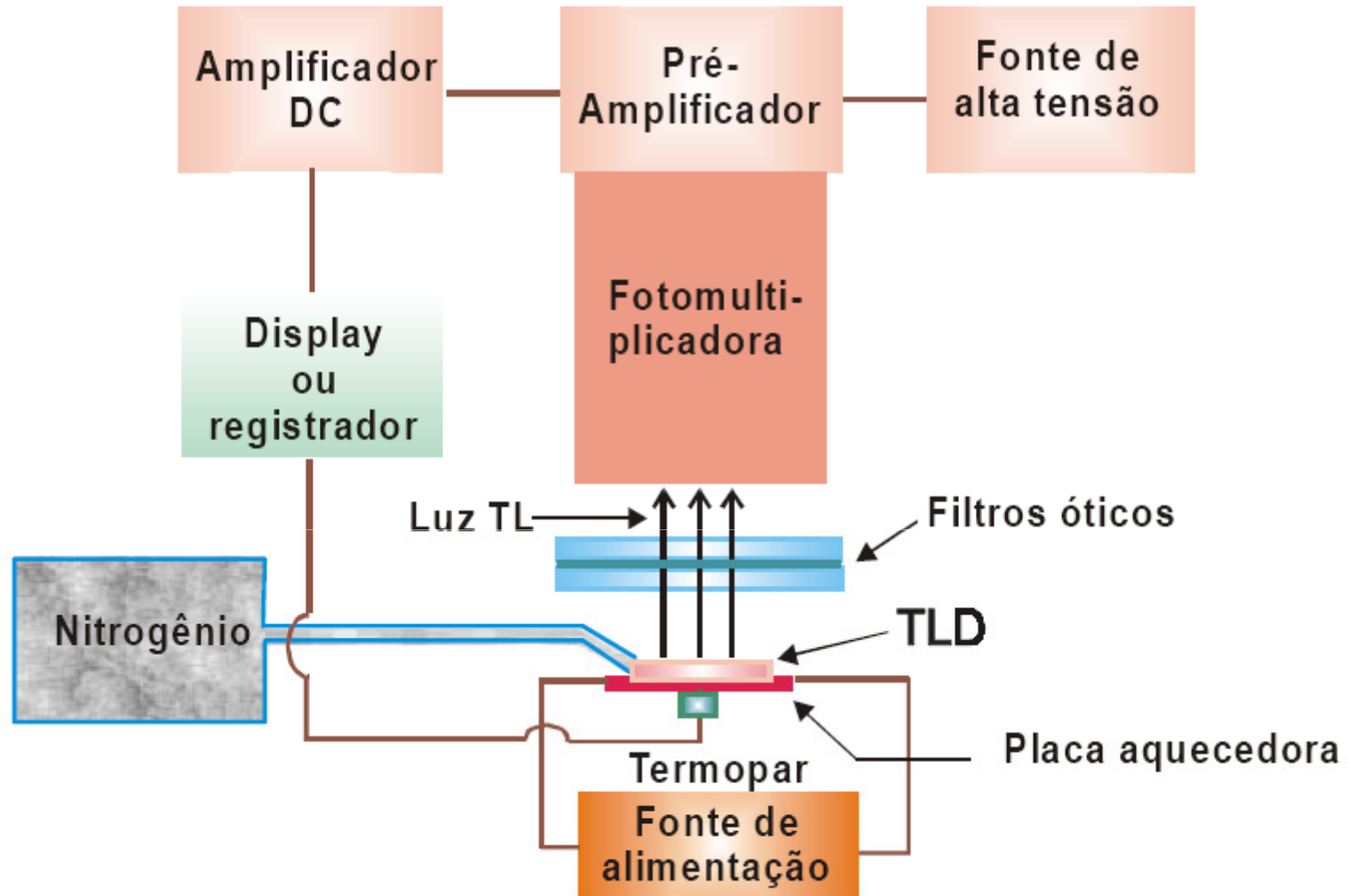


Dosímetros TLD

ÓRGÃO	INDIVÍDUO OCUPACIONALMENTE EXPOSTO	INDIVÍDUO DO PÚBLICO
Corpo inteiro (Dose Efetiva)	20 mSv ^[b]	1 mSv ^[c]
Dose equivalente para o Cristalino	150 mSv	15 mSv
Dose equivalente para a pele ^[d]	150 mSv	50 mSv
Dose equivalente para mãos e pés	500 mSv	---

Leitor de TLD

- O instrumento utilizado para avaliar a dose em função da luz emitida é denominado leitor (ou leitora) TLD.
- É composto de um sistema que faz um aquecimento controlado, de uma válvula foto-multiplicadora, que transforma o sinal luminoso em um sinal elétrico amplificado, e de um sistema de processamento e apresentação (*display*) do sinal.



Esquema de uma leitora TLD

Detectores À Gás

Uso de gases como detectores

- Os detectores à gás constituem os tipos mais tradicionais e difundidos. Foram utilizados desde as experiências iniciais com a radiação ionizante. A interação das radiações com os gases provoca principalmente excitação e ionização dos seus átomos.
- Na ionização, são formados pares elétron-íon que dependem de características dos gases utilizados e da radiação ionizante.
- A coleta dos elétrons e dos íons positivos formados no volume sensível do detector, é feita por meio de campos elétricos e dispositivos apropriados, e serve como uma medida da radiação incidente no detector.

Energia média para formação de um par de íons (W) em um gás

- Quando uma radiação interage com um gás, ionizando-o, os elétrons arrancados pertencem normalmente às últimas camadas, com energias de ligação da ordem de 10 a 20 eV.
- Como nem toda interação resulta em ionização e o elétron atingido nem sempre pertence à última camada, *o valor da energia média para formação de um par de íons (W) em um gás varia em torno de 20 a 45 eV* para os gases mais utilizados.

Energia média para formação de pares de íons em alguns gases

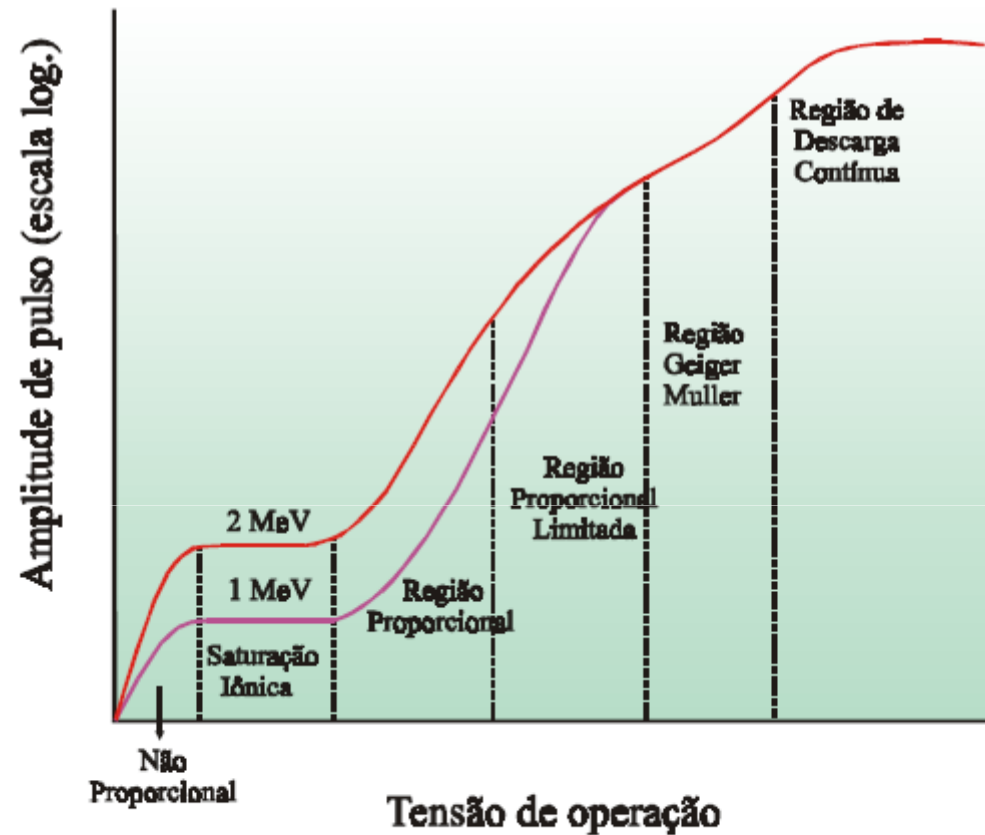
Gás	Valor W (eV/ par de íon)	
	Elétrons rápidos	Partículas alfa
A	26,4	26,3
He	41,3	42,7
H ₂	36,5	36,4
N ₂	34,8	36,4
Ar	33,8	35,1
O ₂	30,8	32,2
CH ₄	27,3	29,1

Formação de pulso de tensão ou de corrente em detectores à gás

- Nos detectores à gás, a carga gerada pelos pares de íons é coletada por meio do campo elétrico criado de forma conveniente por um circuito elétrico. A carga, ao atingir o eletrodo, produz uma variação na carga do circuito, que pode ser detectada e transformada em um sinal elétrico. Essa carga corresponde a uma corrente, que pode ser medida utilizando-se eletrômetros.
- O modo de operação que mede a corrente média gerada em um intervalo de tempo é denominado *modo de operação tipo corrente*.
- Outra forma de operar o detector é registrar o sinal gerado pela radiação, criando um pulso referente à variação de potencial correspondente. Esse modo é denominado *modo de operação tipo pulso*. Nesse caso, o número de pares de íons gerados e coletados corresponde também à intensidade (ou amplitude) do pulso gerado para o detector.

Regiões de operação para detectores à gás

- A probabilidade de interação da radiação com o gás, resultando na formação de pares de íons, varia com o campo elétrico aplicado (ou diferença de potencial aplicada) ao gás dentro do volume sensível. Pode-se separar o intervalo de variação do campo elétrico em seis regiões, pelas características específicas de geração e coleta de carga.
- Essas regiões são:
 - região inicial não-proporcional;
 - região de saturação dos íons;
 - região proporcional;
 - região de proporcionalidade limitada;
 - região do Geiger-Müller; e
 - região acima da região do Geiger-Müller ou região de descarga contínua.

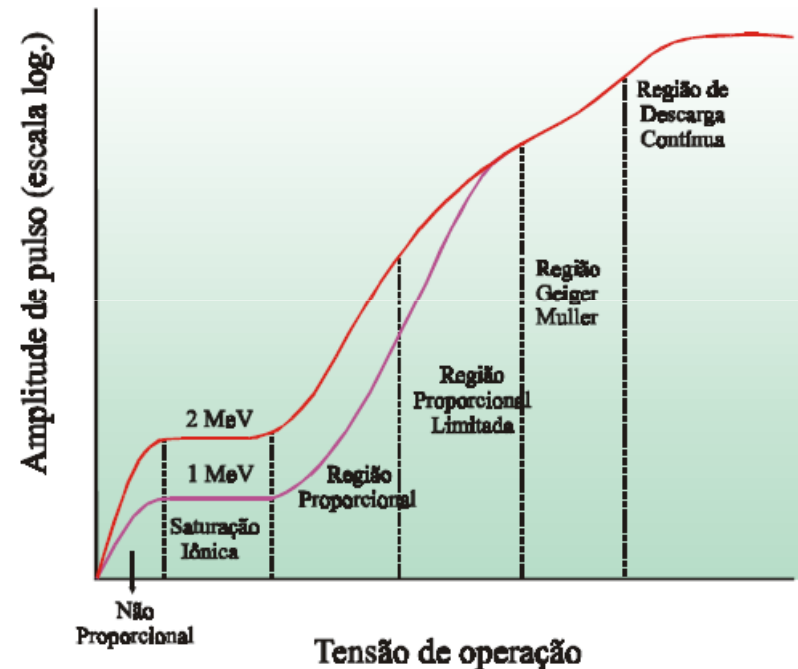


Regiões de operação para detectores à gás

Regiões de operação para detectores à gás

Região inicial não-proporcional

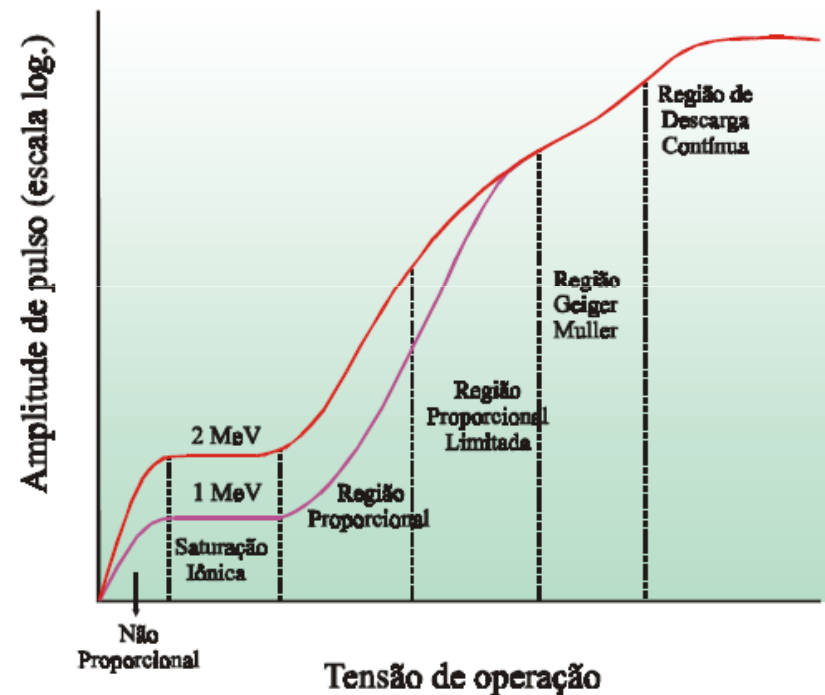
- Nessa região, os pares de íons são formados, mas como o campo elétrico é muito fraco, ocorre um processo de recombinação dos íons e somente parte das cargas geradas são coletadas.
- À medida que a diferença de potencial cresce, os íons são atraídos para os polos elétricos e não têm condições de se recombinar.
- Nessa região é gerada uma carga, mas a amplitude do pulso pode variar sem proporcionalidade com quantidade ou energia da radiação incidente.
- Essa região não é conveniente para a operação de detectores.



Regiões de operação para detectores à gás

Região de saturação de íons

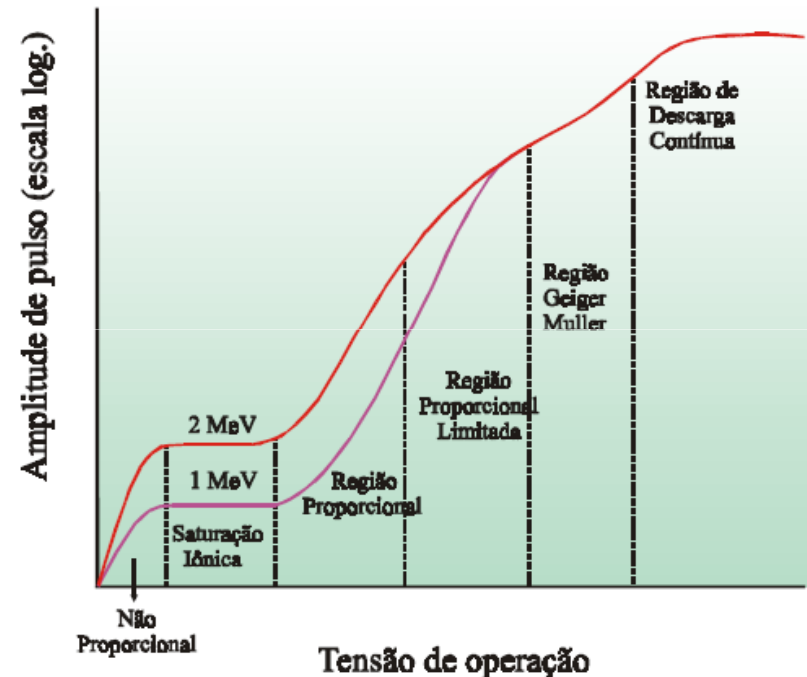
- Após um determinado valor do campo elétrico todos os íons formados são coletados, e o sinal é então proporcional a energia da radiação incidente.
- O valor do sinal permanece o mesmo para um intervalo de variação do campo elétrico, em que a coleta das cargas não traz nenhum processo adicional.
- Nessa região de campo elétrico é que operam os detectores tipo câmara de ionização.



Regiões de operação para detectores à gás

Região proporcional

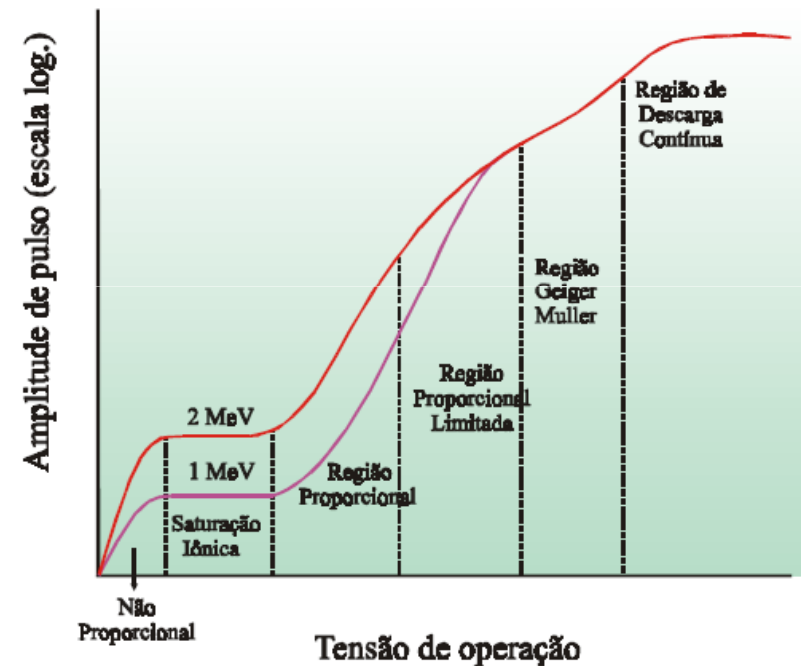
- Com o aumento do campo elétrico, os elétrons acelerados têm energia suficiente para arrancar elétrons de outros átomos e, dessa forma, criar novos pares de íons.
- Ocorre então uma multiplicação, que é linearmente proporcional ao número de pares de íons gerados pela radiação primária. Essa região é também chamada de região de proporcionalidade verdadeira, pois **é onde operam os detectores proporcionais**.
- O sinal inicial é multiplicado por um fator de 10^2 a 10^4 vezes, dependendo do gás e da tensão aplicada. O sinal coletado na maioria das vezes precisa ser pouco amplificado, o que facilita seu processamento.



Regiões de operação para detectores à gás

Região de proporcionalidade limitada

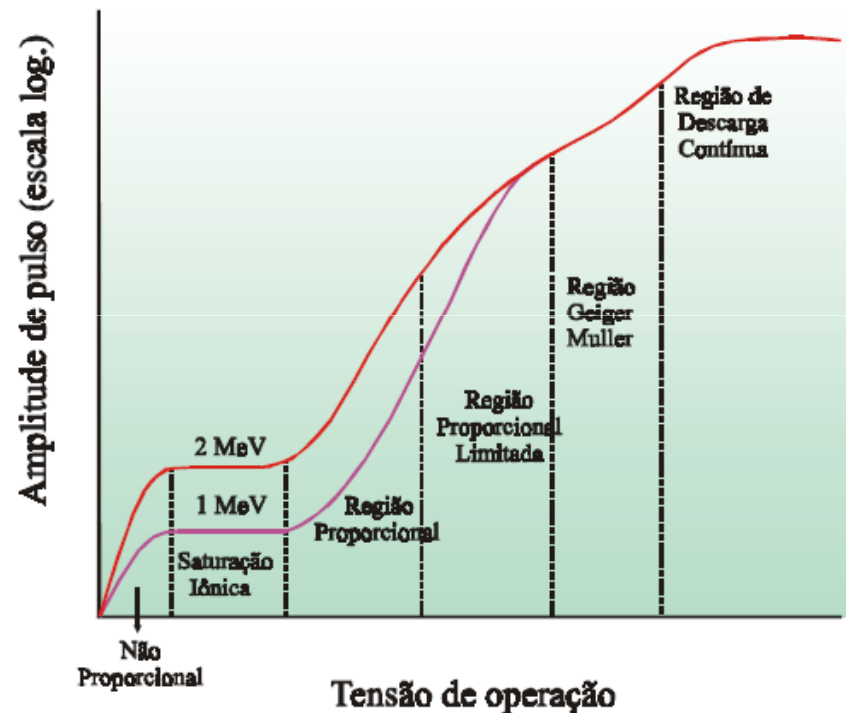
- Continuando a aumentar o campo elétrico, a multiplicação do gás passa a sofrer efeitos não-lineares não guardando mais a relação de proporcionalidade com o número de pares de íons gerados inicialmente.
- Os elétrons criados pela multiplicação são rapidamente coletados no anodo, enquanto que os íons positivos se movem mais lentamente para o catodo. A concentração dessa nuvem de íons positivos tem como efeito criar uma carga espacial próxima ao catodo, alterando a forma do campo elétrico no detector.
- Como as multiplicações subseqüentes dependem do valor do campo elétrico, surgem as não-linearidades que afetam a proporcionalidade. **Nessa região os detectores não operam.**



Regiões de operação para detectores à gás

Região Geiger-Müller

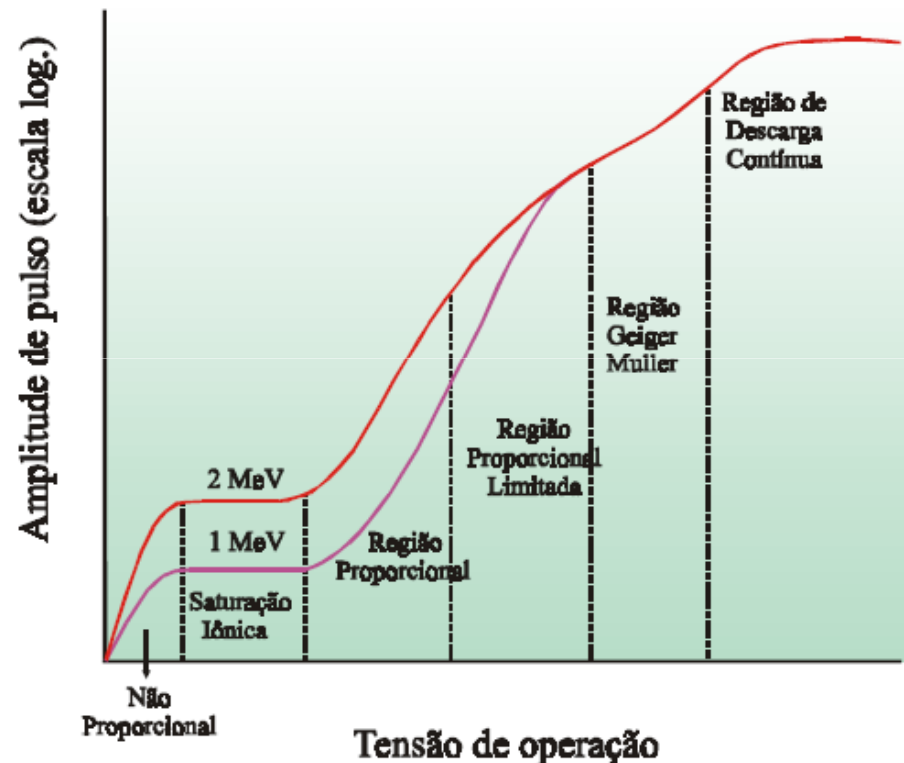
- Se a voltagem aplicada for suficientemente alta, a carga espacial criada pelos íons positivos passa a ser tão grande que a perturbação que cria no campo elétrico interrompe o processo de multiplicação.
- Nesse caso o número de pares de íons criados passará a ser sempre da mesma ordem, independentemente do número de pares criados originalmente e portanto o sinal será independente da energia da radiação.



Regiões de operação para detectores à gás

Região de descarga contínua

- Um aumento ainda maior no valor do campo elétrico irá ocasionar o surgimento de centelhas, não havendo mais relação com o número de íons formados.
- Nessa região não operam os detectores e, se operados nessa região, podem ser danificados.



Regiões de operação para detectores à gás

Câmaras de ionização

- A câmara de ionização opera na região de saturação de íons e para cada par de íon gerado pela partícula no interior do volume sensível do detector gasoso um sinal é coletado.
- Apesar disso, a corrente coletada é muito baixa, normalmente da ordem de 10^{-12} A e precisam ser utilizados amplificadores para o sinal poder ser convenientemente processado.
- As câmaras de ionização trabalham normalmente no modo corrente e se convenientemente construídas, utilizando o ar como elemento gasoso, são capazes de medir diretamente a grandeza exposição.

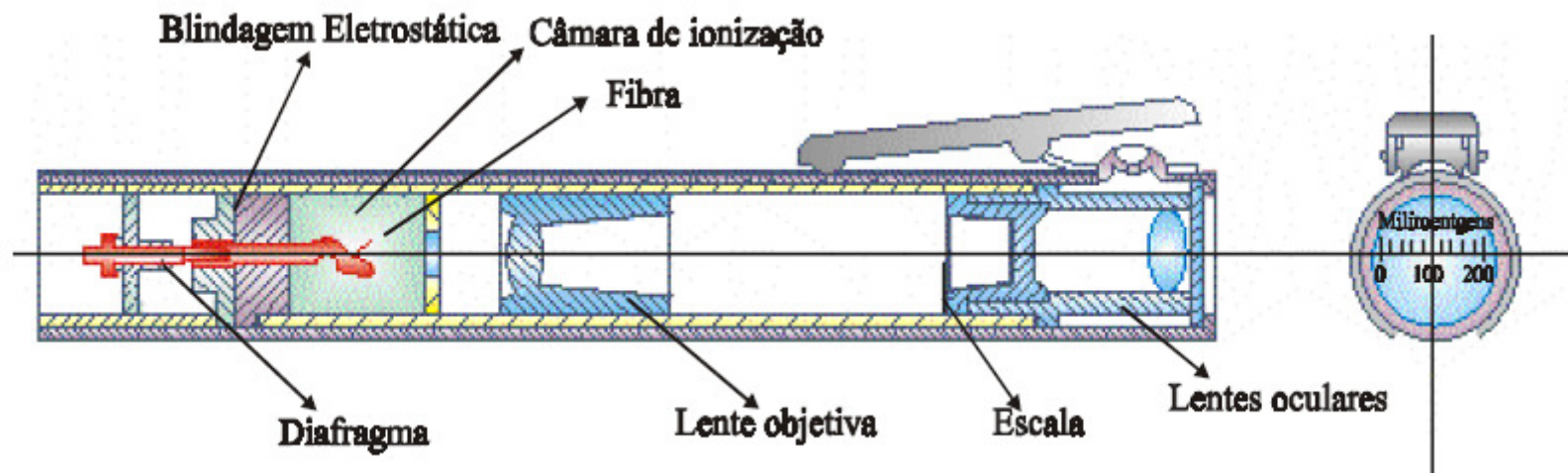
Câmaras de ionização

- Alguns tipos de detectores especiais funcionam dentro do modo de câmara de ionização. Entre eles podem ser citados:
- *Câmara de ionização “free air”*: *consiste de uma estrutura convenientemente montada e aberta de forma que a interação com radiação é medida diretamente no ar*, ou seja, o volume sensível do detector é menor que o do recipiente em que está contido. A camada de ar entre o volume sensível e as paredes da câmara faz com que o volume sensível não sofra influência da interação da radiação com as paredes.

Câmaras de ionização

- **Caneta dosimétrica:** *muito utilizada em monitoração pessoal, consiste em uma câmara de ionização onde um fio de quartzo serve como cursor para indicar a exposição (ou dose) acumulada.* Utilizando um carregador, insere-se, sob pressão, a caneta para ser “zerada”.

Na prática significa que lhe foi fornecida uma carga elétrica máxima, que vai se esvaindo com o surgimento dos elétrons e íons formados pela radiação, dentro do volume da câmara. Assim, o fio de quartzo vai se aproximando do eletrodo de carga de mesmo sinal e, pela lente, observa-se a leitura da exposição ou dose absorvida.



Câmara de Ionização Tipo Caneta Dosimétrica
- detecta radiações do tipo γ (gama) e raios X > 80 keV.

Câmaras de ionização

- **Câmara de ionização portátil:** *é uma câmara de ionização a ar ou gás sob pressão, destinada a medições de taxas de exposição, taxa de dose e dose acumulada, para radiações X e gama e, às vezes, beta.*
- É construída de material de baixo Z ou tecido-equivalente.



Câmara de Ionização. Detecta radiações do tipo α (alfa) > 4 MeV, β (beta) > 100 keV, γ (gama) e raios X > 7 keV.

Câmaras de ionização

- **Câmara de ionização tipo poço:** *a câmara de ionização é montada de forma que a fonte radioativa a ser medida possa ser introduzida no “poço” criando uma condição de eficiência de praticamente 100 %.*
- **É muito utilizada na medição de atividade de fontes radioativas.**
- **Exemplo: curiômetro.**



Câmaras de ionização tipo poço

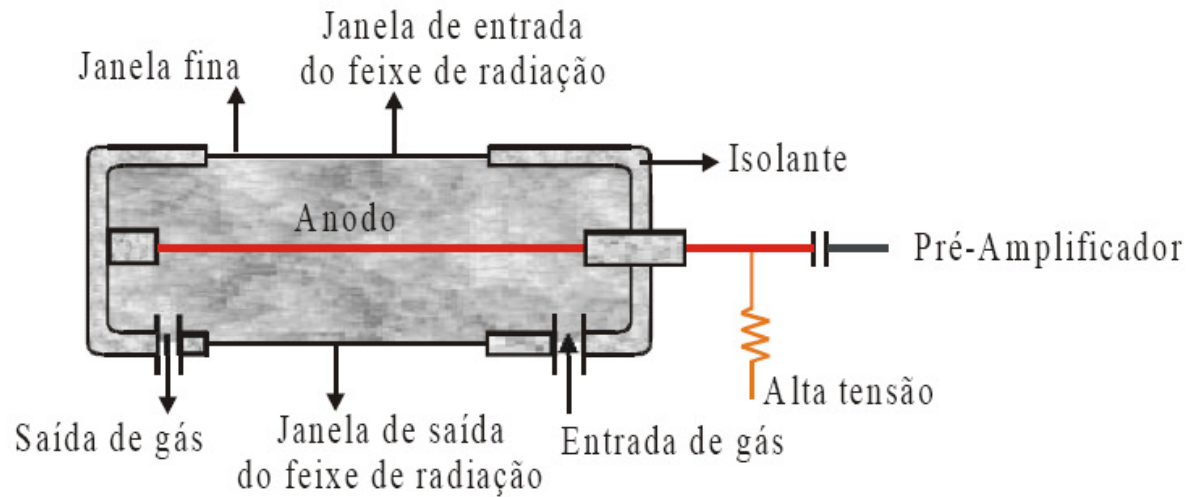
Câmaras de ionização

- **Câmara de extrapolação:** *câmara montada com distância entre eletrodos variável, permite a medição de valores diferentes de volume ionizado sendo utilizada para o cálculo de dose absorvida para radiações de baixa energia (fótons e elétrons), utilizando a técnica de extrapolação.*

Detectores Proporcionais

Detectores proporcionais

- Os detectores proporcionais foram introduzidos no início dos anos 40. Operam quase sempre no modo pulso e se baseiam no fenômeno de multiplicação de íons no gás para amplificar o número de íons originais criados pela radiação incidente.
- Os pulsos originados são muitas vezes maiores que aqueles das câmaras de ionização e, por esse motivo, os detectores proporcionais são muito convenientes para as medições de radiação onde o número de pares de íons é muito pequeno para permitir uma operação satisfatória de uma câmara de ionização. Dessa forma, uma das aplicações importantes de detectores proporcionais é na detecção e espectroscopia de raios X, elétrons de baixa energia e radiação alfa.
- Contadores proporcionais são também largamente aplicados na detecção de nêutrons, utilizando reações nucleares tipo (n,p) , (n,γ) . O material que reage com os nêutrons é colocado dentro do proporcional, podendo ser o próprio gás de preenchimento.



Esquema de um detector proporcional cilíndrico.



Detector proporcional portátil para medição de contaminação superficial.

Detectores Geiger-Müller

Detectores Geiger-Müller

- Os detectores Geiger-Müller foram introduzidos em 1928 e em função de sua simplicidade, baixo custo, facilidade de operação e manutenção, são utilizados até hoje.
- Em função de sua característica de um pulso de saída de igual amplitude, independentemente do número de íons iniciais, o detector G-M funciona como um contador, não sendo capaz de discriminar energias.
- Para cada partícula que interage com o volume sensível do detector, é criado um número da ordem de 10^9 a 10^{10} pares de íons.
- Assim, a amplitude do pulso de saída formado no detector é da ordem de volt, o que permitir simplificar a construção do detector, eliminando a necessidade de um pré-amplificador.



Medidor com detector interno tipo Geiger-Müller.
Detecta radiações do tipo γ (gama) > 50 Kev.



Medidor com detector fixo externo tipo Geiger
Müller. Detecta radiações do tipo α (alfa) > 4 MeV,
 β (beta) 100 keV, γ (gama) e raios X > 50 keV.



Medidor com detector interno tipo Geiger-
Müller. Detecta radiações do tipo α (alfa) > 4
MeV, β (beta) 100 keV, γ (gama) e raios X > 50
keV.



Detectores à Cintilação

Detectores à Cintilação

- A utilização de materiais cintiladores para detecção de radiação é muito antiga - o sulfeto de zinco já era usado nas primeiras experiências com partículas - e continua sendo uma das técnicas mais úteis para detecção e espectroscopia de radiações.



Cintilômetro portátil, de alta sensibilidade, utilizado em atividades de triagem e localização de fontes emissoras de radiação gama.



Espectrômetro gama, com NaI(Tl) e analisador multicanal, portátil, que **permite determinar a energia da radiação**, obter o espectro e identificar o radionuclídeo.

Características importantes de materiais cintiladores

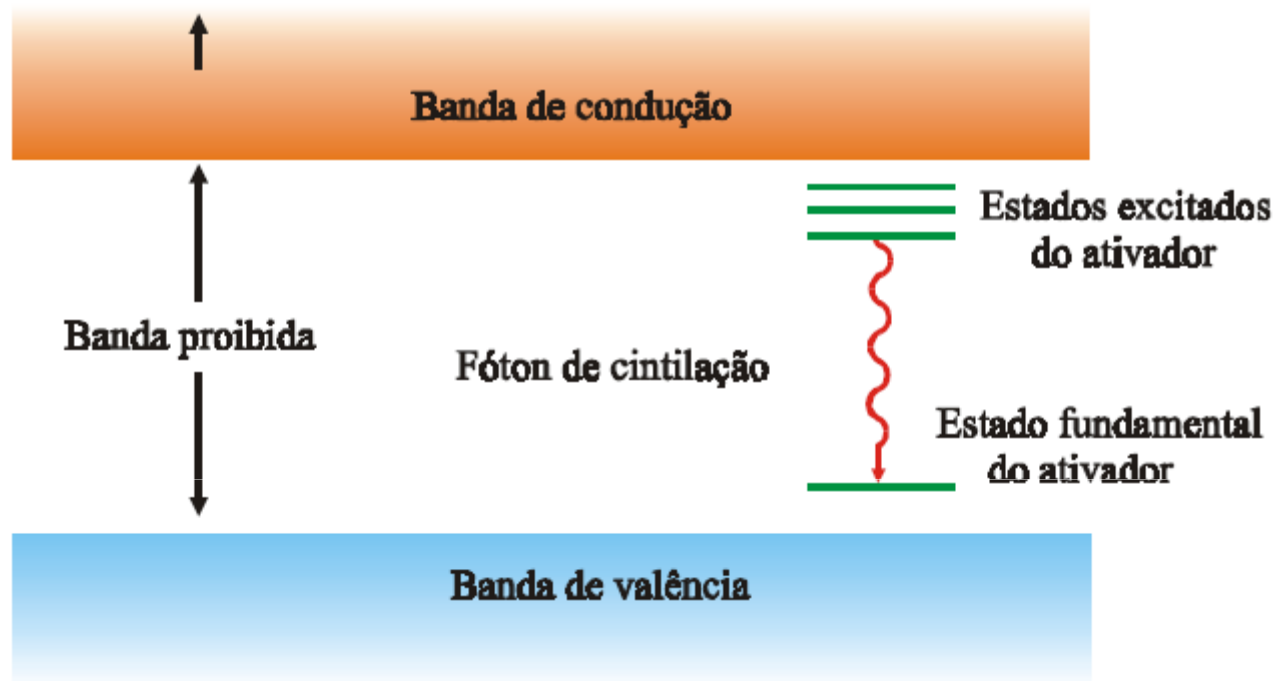
- Algumas das características ideais de um bom material cintilador são:
 - que transforme toda energia cinética da radiação incidente ou dos produtos da interação em luz detectável;
 - que a luz produzida seja proporcional à energia depositada;
 - que seja transparente ao comprimento de onda da luz visível que produz;
 - que tenha boa qualidade ótica, com índice de refração próximo ao do vidro (aprox. 1,5);
 - que seja disponível em peças suficientemente grandes para servir para construção de detectores;
 - que seja facilmente moldável e/ou usinável para construir geometrias adequadas de detectores.

Eficiência de cintilação

- A eficiência de cintilação para um cintilador é **definida como** *a fração da energia de todas as partículas incidentes que é transformada em luz visível.*
- *Existe uma série de interações da radiação com o material cintilador com transferência de energia e, a desexcitação, não ocorre através da emissão de luz, mas principalmente sob a forma de calor.*

Emissão de luz em materiais cintiladores inorgânicos

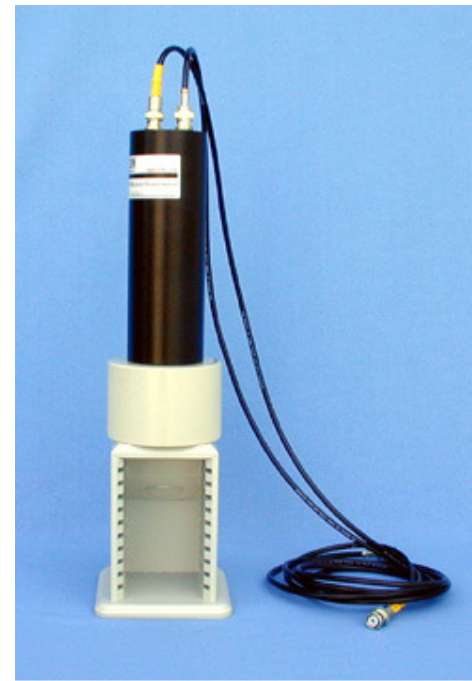
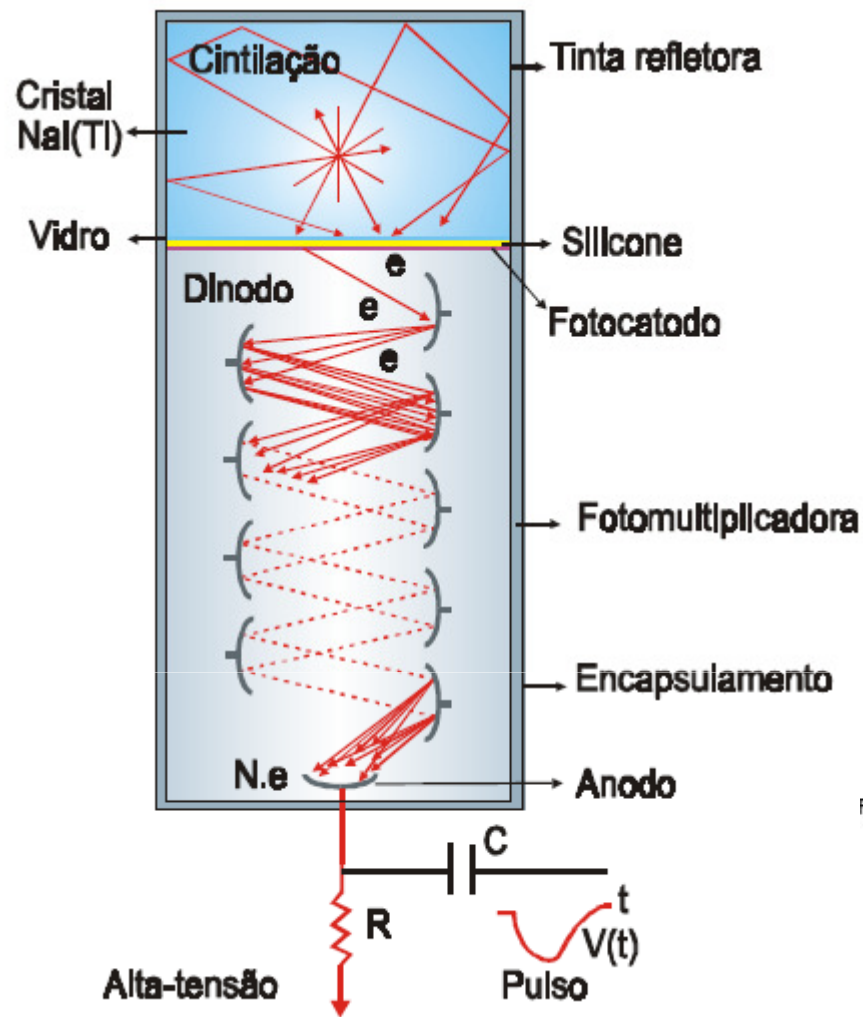
- O mecanismo de cintilação em materiais inorgânicos depende dos estados de energia definidos pela rede cristalina do material. Dentro dos materiais isolantes ou semicondutores os elétrons têm disponíveis para ocupar somente algumas bandas discretas de energia.
- A banda de valência representa os elétrons que estão essencialmente ligados aos sítios da rede cristalina, enquanto que a banda de condução representa os elétrons que têm energia suficiente para migrar livremente através do cristal. Existe uma banda de energia intermediária, denominada banda proibida, onde os elétrons nunca são encontrados.
- Quando determinadas substâncias são introduzidas no cristal (ainda que em quantidades muito pequenas) são criados sítios especiais na rede cristalina dentro da chamada banda proibida,
- Os elétrons da banda de valência ao receberem energia suficiente da radiação, ocupam os níveis de energia criados pela presença do ativador. Ao se desexcitarem e retornarem aos níveis de valência, os elétrons emitem a energia referente à diferença dos níveis, na forma de fótons, que são então propagados pela estrutura cristalina.



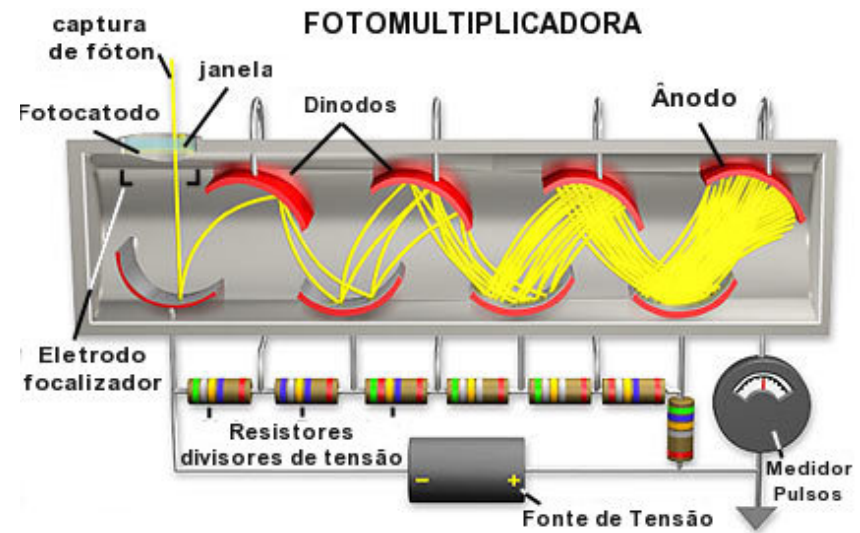
Estrutura de bandas de energias em um cintilador cristalino ativado

A válvula fotomultiplicadora

- Um dispositivo fundamental para a utilização dos detectores à cintilação é a fotomultiplicadora, *que transforma os sinais luminosos produzidos pela radiação, usualmente muito fracos, em sinais elétricos com intensidade conveniente para serem processados em um sistema de contagem ou de espectroscopia.*



FOTOMULTIPLICADORA



Elementos básicos de uma válvula fotomultiplicadora



Cintilômetro acoplado a um computador.

Materiais cintiladores

- O iodeto de sódio
- O iodeto de sódio ativado com o tálio - NaI(Tl) - é um dos materiais mais utilizados, pelas suas características de resposta à radiação, pela facilidade de obtenção do cristal em peças grandes e de se obter o cristal “dopado” com tálio.
- Além de sua capacidade de produção de luz visível, o NaI(Tl) responde linearmente para um grande intervalo de energia para elétrons e raios .
- O iodeto de sódio é um material altamente higroscópico, e para evitar sua deterioração pela umidade, é encapsulado, normalmente com alumínio.

Gama-Câmara

- É um dos principais equipamentos presentes nos serviços de Medicina Nuclear. Consiste de um grande cristal de iodeto de sódio dopado com tálio (NaI(Tl)) que detecta os raios gama emitidos no decaimento dos radioisótopos administrados ao paciente.
- O cristal tem eficiência relativamente elevada para a absorção de radiação gama. A energia dos raios gama absorvidos provoca excitações na rede cristalina que volta ao equilíbrio emitindo luz visível. A luz visível, por sua vez, é detetada por algumas dezenas de tubos fotomultiplicadores ou diodos sensíveis à luz que, acoplados a uma eletrônica dedicada, identificam a posição de incidência do raio gama e a sua energia, enviando estas informações ao computador que monta a imagem.
- Fazendo-se a aquisição de dados para diferentes ângulos da câmara com relação ao eixo do paciente é possível fazer uma tomografia conhecida como tomografia por emissão de fótons (SPECT - *single photon emission computed tomography*). Esta tomografia, no entanto, fornece informações sobre o funcionamento dos órgãos investigados, diferentemente da tomografia computadorizada com raios X, onde são obtidos detalhes *anatômicos* dos órgãos.



Gama-Câmara

Materiais cintiladores

- O iodeto de céσιο
- O iodeto de céσιο ativado com tálio ou com sódio [CsI(Tl) e CsI(Na)] é outro material bastante utilizado como detector de cintilação.
- Sua principal qualidade em relação ao iodeto de sódio é seu maior coeficiente de absorção em relação à radiação gama, permitindo a construção de detectores mais compactos.
- Além disso, tem grande resistência a choques e a vibrações, em função de ser pouco quebradiço.

Materiais cintiladores

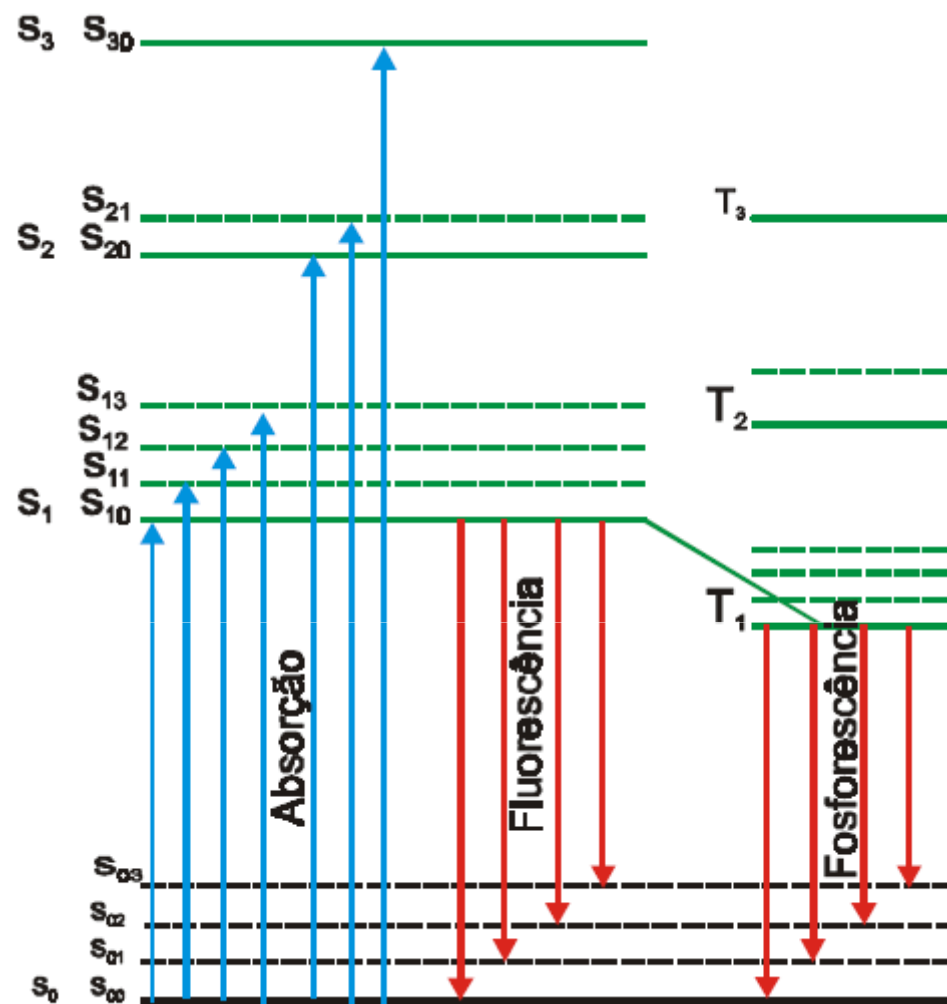
- **O germanato de bismuto**
- O detector de germanato de bismuto ou BGO - $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ - tornou-se disponível no final dos anos 70 e rapidamente passou a ser utilizado em um grande número de aplicações.
- A principal vantagem do BGO é sua alta densidade (7,3 g/cm³) e o elevado número atômico do bismuto, o que faz dele o detector com maior probabilidade de interação por volume entre os mais comumente utilizados.
- Outra característica do BGO é ser um cintilador inorgânico puro, isto é, não necessita de um ativador para promover o processo de cintilação. Isso ocorre porque a luminescência está associada à transição ótica do Bi^{3+} . Comparado ao iodeto de sódio, tem, além disso, boas propriedades mecânicas e de resistência à umidade.
- As principais desvantagens do cristal de BGO são: sua baixa produção de luz, aproximadamente 10 a 20% daquela produzida em iguais condições pelo iodeto de sódio e seu custo, que é duas a três vezes o deste último.

Materiais cintiladores

- **Sulfeto de zinco ativado**
- O sulfeto de zinco ativado - $\text{ZnS}(\text{Ag})$ - é um dos cintiladores inorgânicos mais antigos.
- Tem alta eficiência de cintilação, comparável à do $\text{NaI}(\text{Tl})$, mas só é disponível como pó policristalino, sendo seu uso limitado a telas finas, por ser opaco à luz, utilizadas principalmente para partículas e íons pesados.
- As telas de sulfeto de zinco foram utilizadas por **Rutherford** em suas experiências clássicas sobre a estrutura da matéria.

Emissão de luz em materiais cintiladores orgânicos

- O processo de fluorescência em materiais orgânicos ocorre a partir de transições na estrutura dos níveis de energia de uma **molécula isolada** e pode ser observado para uma dada espécie molecular independentemente de seu estado físico, o que não ocorre no caso dos materiais orgânicos cristalinos, que dependem de uma estrutura cristalina para que ocorra o processo de cintilação.
- As moléculas dos materiais orgânicos termoluminescentes têm normalmente estados excitados com espaçamento em energia bastante elevados comparados às energias térmicas médias (0,025 eV). **Esses níveis são subdivididos em subníveis, com pequenas diferenças de energia entre eles.**



Níveis de energia em uma molécula orgânica.

Materiais cintiladores orgânicos

- Somente dois materiais alcançaram grande popularidade como cintiladores cristalinos orgânicos: o antraceno e o estilbeno.
- O antraceno é um dos materiais orgânicos mais antigos utilizados para cintilação e tem a característica de ter a maior eficiência de cintilação entre os materiais orgânicos.
- Os dois materiais são relativamente frágeis e difíceis de obter em grandes peças.
- Além disso, a eficiência de cintilação depende da orientação da partícula ionizante em relação ao eixo do cristal.

Cintiladores plásticos

- Utilizando cintiladores líquidos que podem ser polimerizados é possível produzir soluções cintiladoras sólidas. Um exemplo é o monômero de estireno no qual é dissolvido um cintilador orgânico apropriado.
- Os plásticos tornaram-se uma forma extremamente útil de cintiladores orgânicos, uma vez que podem ser facilmente moldados e fabricados.
- O preço baixo e facilidade de fabricação, tornaram sua escolha praticamente exclusiva quando se necessita de cintiladores sólidos de grande volume.

Detectores à Cintilação Líquida

A solução cintiladora

- Uma solução cintiladora, ou coquetel de cintilação, é constituído por duas ou mais substâncias que possuem a função de produzir fótons, com comprimentos de onda adequados à máxima sensibilização do tubo fotomultiplicador utilizado, e ao mesmo tempo servir de suporte de fonte para a amostra radioativa que se deseja medir.

A solução cintiladora

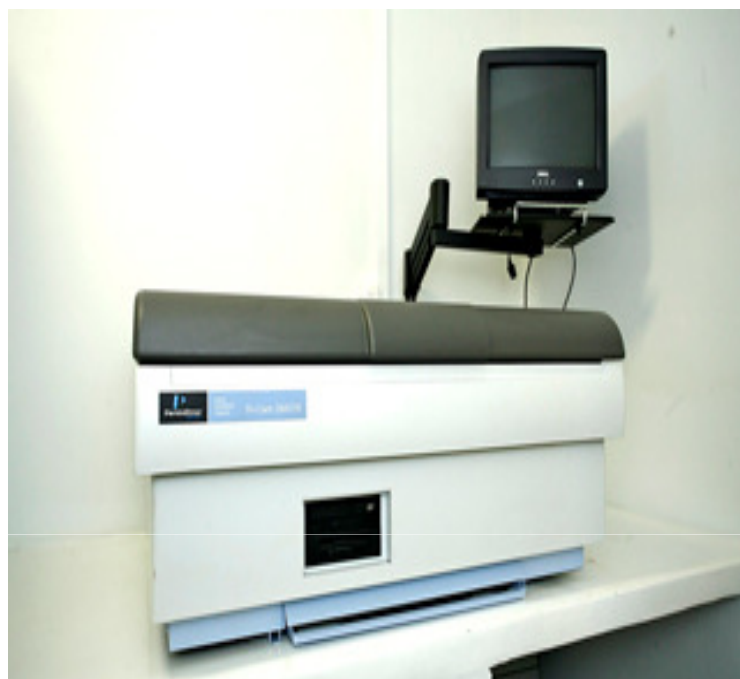
- Soluções cintiladoras comerciais

Instagel e Aquasol

Permitem adicionar dissoluções orgânicas e inorgânicas, com incorporação de até 20% de fase aquosa

Hisafe e Ultima Gold

Permitem manter a homogeneidade com a incorporação de até 25% de fase aquosa, proporciona maior eficiência de contagem que os dois anteriores e utiliza o Diisopropil-Naftaleno como solvente



Equipamento de medição da atividade de radionuclídeos emissores de radiação alfa, beta e gama, utilizando a técnica de Cintilação Líquida.

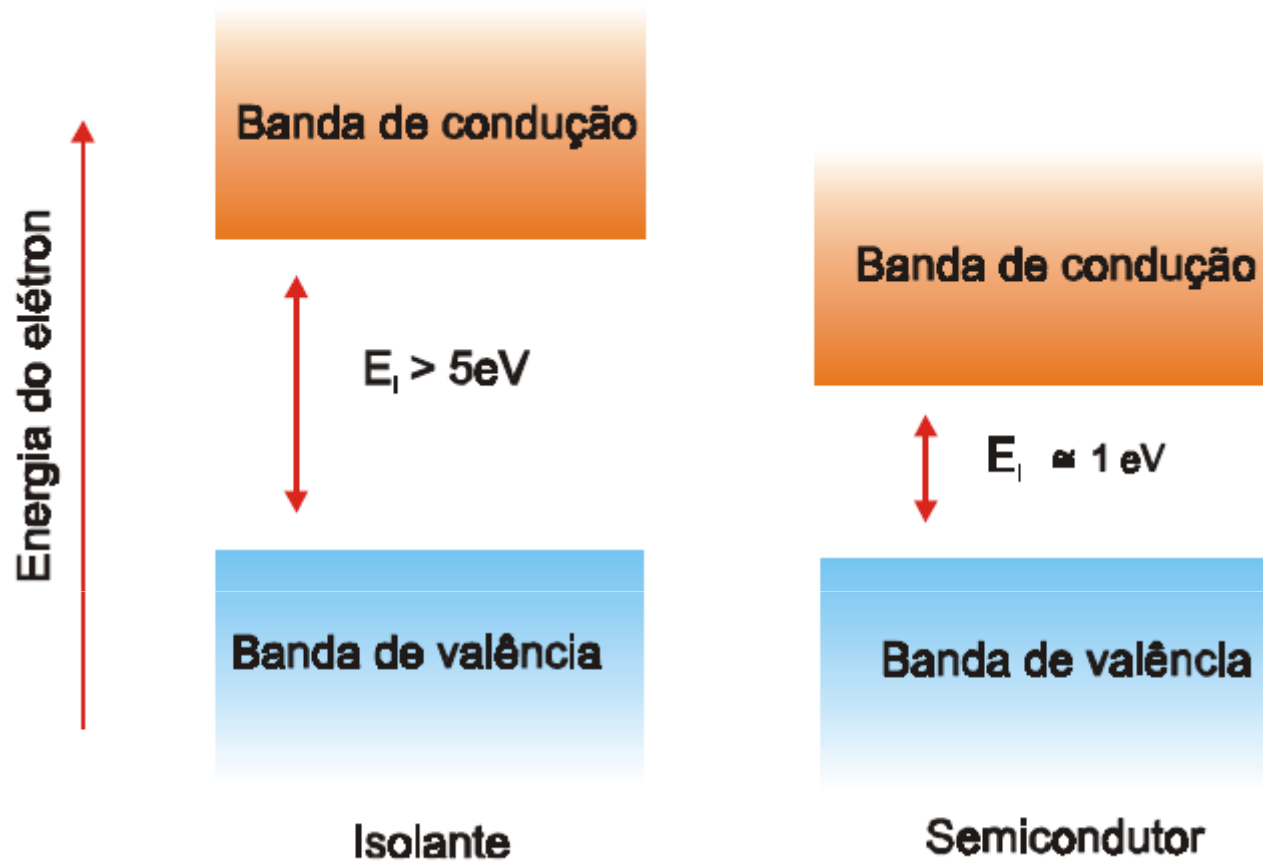
Detectores Utilizando Materiais Semicondutores

Formação de pulsos em materiais semicondutores

- **Materiais isolantes, condutores e semi-condutores**
- Em materiais cristalinos, pode-se dizer, de forma simplificada, que há três bandas de energia em relação a condutividade de elétrons: a **banda de valência**, de energia mais baixa, onde os elétrons normalmente se encontram em um material não excitado; a **banda de condução**, por onde os elétrons normalmente migram, e uma **banda proibida**, que é uma região onde os elétrons não são permitidos estar.
- A largura em energia da banda proibida é o que caracteriza os materiais isolantes, os semi-condutores e os condutores.

Formação de pulsos em materiais semicondutores

- **Materiais isolantes, condutores e semi-condutores**
- Quando a largura é muito grande (maior que 5 eV) os elétrons têm pouca possibilidade de alcançar a banda de condução e, portanto, o material oferece grande resistência a passagem de corrente; **nesse caso o material é um isolante.**
- Quando a largura da banda é muito pequena, até mesmo a agitação térmica à temperatura ambiente faz com que os elétrons tenham energia para chegar na banda de condução, **e nesse caso o material é um condutor.**
- Em alguns casos, a energia da banda proibida não é nem tão grande, nem tão pequena (é, por exemplo, da ordem de 1 eV), mas, em determinadas circunstâncias pode-se fazer com que os elétrons alcancem a banda de condução e que o material se comporte como condutor; **são materiais semi-condutores.**



Estrutura de bandas em um material (E_i energia do intervalo).

Detectores de diodos de silício

- Os detectores de diodo de silício constituem o principal tipo de detector utilizado para partículas carregadas pesadas, como prótons, alfas e fragmentos de fissão.
- As principais vantagens dos detectores de diodo de silício são a resolução excepcional, a boa estabilidade, o excelente tempo de coleta de carga, a possibilidade de janelas extremamente finas e a simplicidade de operação.
- Os detectores de diodo de silício são normalmente de tamanho pequeno, da ordem de 1 a 5 cm² de área.

Detectores de germânio

- Os detectores de germânio dopado com lítio - Ge(Li) - foram largamente utilizados, por sua resolução na espectroscopia gama, mas têm sido rapidamente substituídos, principalmente por causa das dificuldades operacionais, exigindo que sejam mantidos em refrigeração à temperatura do nitrogênio líquido (770 K), mesmo quando não estão em funcionamento, para evitar danos em suas estrutura com a migração do lítio no material.
- Os substitutos preferidos têm sido os detectores de germânio de alta pureza - HPGe - também denominados de germânio hiperpuros ou de germânio intrínseco, que só necessitam de refrigeração quando em operação, podendo manter-se na temperatura ambiente pelo período de muitos dias sem danos ou alterações em suas condições.
- Os detectores de germânio para espectroscopia gama são construídos geralmente na geometria cilíndrica ou coaxial, o que permite se obter volumes maiores, necessários para espectrometria gama.



Detector de germânio de alta pureza, resfriado a nitrogênio líquido, utilizado em técnicas de espectrometria X e gama, em medições de laboratório.

Detector de barreira de superfície

- Uma das utilizações do silício é na construção dos detectores de barreira de superfície que são caracterizados pela camada morta muito fina e são utilizados principalmente para a detecção de partículas α e β .
- São detectores formados pela junção de duas superfícies, uma tipo n e outra tipo p . Normalmente os detectores de barreira de superfície são constituídos de uma pastilha fina de Si de alta pureza do tipo n (excesso de elétrons), sobre a qual é depositada uma camada fina de ouro.
- Uma desvantagem do detector é sua sensibilidade à luz, mas como normalmente ele é utilizado dentro de uma câmara à vácuo, para evitar a interação das partículas com o ar, isto elimina esse problema.

Detectores de silício-lítio

- Os detectores de silício dopados com lítio - Si(Li) - são pouco recomendáveis para o uso em espectrometria gama, em função do baixo número atômico do silício ($Z = 14$), quando comparado com o germânio.
- No entanto, essa característica os torna convenientes para a espectrometria de raios X de baixa energia e para detecção e espectrometria de elétrons.
- Ao contrário do que ocorre com os detectores Ge (Li), a mobilidade do lítio no silício não é tão alta, fazendo com que possa passar algum tempo à temperatura ambiente, embora seja indispensável a refrigeração com nitrogênio quando em operação.
- A refrigeração ajuda também a melhorar a relação sinal-ruído, uma vez que aumenta a resistividade e a mobilidade de cargas no condutor.

Detectores de telureto de cádmio

- O telureto de cádmio (CdTe) combina pesos atômicos relativamente altos (48 e 52) com uma banda de energia suficientemente grande para permitir operar à temperatura ambiente.
- Para energias típicas de raios γ , a probabilidade de absorção fotoelétrica por unidade de caminho percorrido é da ordem de 4 a 5 vezes maior que no germânio e 100 vezes maior que no silício.
- Normalmente este detector tem grande utilidade para situações em que se deseja grande eficiência de detecção para raios de alta energia por unidade de volume.

Bibliografia

- ANDREUCCI, R. **Proteção Radiológica: Aspectos Industriais.** São Paulo:Abende, 2003.
- BELLINTANI, S. A; GILI, F. N. (orgs). **Noções Básicas de Proteção Radiológica.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), 2002.
- KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement.** New Jersey: John Wiley & Sons, 2000.
- TAUHATA, L.; SALATI, I. P. A.; PRINZIO, R. D.; PRINZIO, A. D. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos.** Rio de Janeiro: Ed. Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 2005.

Obrigado pela atenção.