

A2 - DETECÇÃO DA RADIAÇÃO

2.1 PROPRIEDADES DA RADIAÇÃO NUCLEAR /3, 5/

O estudo da detecção das radiações nucleares requer uma compreensão da interação da radiação com a matéria.

A natureza das interações com a matéria varia entre os tipos diferentes de radiação nuclear, isto é, cada tipo de radiação apresenta uma característica específica de interação com a matéria.

Neste capítulo não são abordados todos os tipos de radiação, bem como suas interações com a matéria e seus respectivos mecanismos de detecção e sim um grupo selecionado de maior interesse.

Os tipos de radiação abordados são:

- Radiação Alfa.
- Fragmentos de Fissão.
- Elétrons.
- Radiação X e Gama.
- Nêutrons.

Para efeito de fixação de conhecimentos, repetir-se-ão sempre que possível, conceitos e definições importantes já mencionados.

2.1.1 - Radiação Alfa

A partícula alfa é um núcleo de Hélio-4, possuindo dois prótons e dois nêutrons.

Quando a partícula alfa passa através da matéria, ela perde energia através de excitação e ionização dos átomos da matéria.

O principal responsável pela perda de energia desta radiação é a interação dos campos "Coulombianos" da partícula com os elétrons ligados da matéria. Em virtude das pequenas massas relativas das partículas envolvidas, as deflexões da partícula alfa são desprezíveis, por isso elas caminham quase em linha reta.

A absorção da partícula alfa pode ser estudada experimentalmente através da medida do número de pares de íons produzidos por unidade de caminho percorrido. Esta quantidade é conhecida como ionização específica.

As partículas alfas que são, inicialmente, monoenergéticas, isto é, possuem a mesma energia, percorrem distâncias aproximadamente iguais na matéria. O alcance médio (em centímetros) de uma partícula alfa no ar (em condições normais) com energia entre 4 e 7 MeV é dado pela seguinte equação empírica:

$$R = 0,309 E^{3/2} \quad 2.1$$

sendo R em [cm], e E a energia da partícula alfa em MeV.

2.1.2 Fragmentos de Fissão

Os fragmentos de fissão contém elementos de número de massa aproximadamente de 80 até 155.

A carga líquida dos produtos de fissão decresce continuamente durante o processo de moderação (perda de velocidade). Por isso, suas propriedades são diferentes das partículas alfas. Um outro fato que difere os fragmentos de fissão das partículas alfa são as suas colisões com os elétrons da matéria, o que, praticamente, não ocorre com a radiação alfa. Portanto, é difícil obter uma fórmula mesmo que empírica para expressar o alcance desta radiação.

Os fragmentos de fissão por todas estas razões mencionadas, constituem-se num dos mais ionizantes tipos de radiação.

2.1.3 - Elétrons

Elétrons que são emitidos do núcleo em decaimentos radioativo são conhecidos como beta menos ou simplesmente partículas beta. Quando outros tipos de radiações, tais como raios gama passam através da matéria, liberam elétrons energéticos, essas partículas são referidas como elétrons secundários.

Os elétrons diferem das partículas alfas pelo seu caminho sinuoso através da matéria e seus alcances definidos.

Elétrons perdem energia na matéria como as partículas pesadas, através de excitação e ionização dos elétrons ligados desta matéria. Entretanto, há um outro mecanismo de perda de energia, este é aquele relacionado com emissão de radiação eletromagnética que frequentemente é referida como "Bremsstrahlung".

A expressão empírica que fornece o alcance do elétron na matéria não é de grande importância para os nossos propósitos. No entanto, é importante chamar atenção para o fato que este alcance quando expresso em termos de massa por unidade de área é independente do número atômico da matéria (ou absorvedor) para uma boa aproximação, ou seja, $R \text{ (g/cm}^2\text{)}_{Z_1} \cong R \text{ (g/cm}^2\text{)}_{Z_2}$.

2.1.4 - Raios X e γ

São duas formas de ondas eletromagnéticas diferindo entre si apenas pelas suas origens. Radiações gamas são produzidas em reações nucleares, enquanto as radiações X são causadas por excitação ou remoção de elétrons orbitais ou por desaceleração de elétrons. As radiações gama e X consistem de fótons cada um com uma energia E_p dada por:

$$E_p = h \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad 2.2$$

onde:

h = constante de Planck.

c = velocidade da luz.

ν e λ = frequência e comprimento de onda respectivamente que estão associados com a natureza ondulatória da radiação.

A emissão de raios gama é um mecanismo pelo qual a energia de excitação de um núcleo pode ser removida. Tais estados excitados podem acompanhar o decaimento de radioisótopos, ou eles podem resultar de transmutações nucleares induzidas. Os raios gamas, acompanhando um tipo particular de reação nuclear são compostos de fótons com

uma única energia ou um grupo discreto de energias. Energias típicas dos raios gama vão de alguns keV até vários MeV.

A excitação ou remoção dos elétrons orbitais, que precedem a produção de raios X, podem ser efetuadas de várias formas, incluindo o espalhamento inelástico de outros elétrons, fenômeno de conversão interna e processo de captura de elétrons. A energia liberada após o retorno dos elétrons orbitais ao estado fundamental surge como fóton de raios X conhecido como radiação fluorescente. A energia dos fótons é característica do elemento, variando de uns poucos eletrovolts para os elementos leves até 0,1 MeV para os elementos transurânicos.

A interação dos raios X ou γ com a matéria se manifesta primariamente através de 3 mecanismos, a saber:

- Efeito Fotoelétrico.
- Efeito com Espalhamento Compton.
- Produção de Pares.

2.1.4.1 Efeito Fotoelétrico

Neste efeito, um fóton de energia $h\nu$ interage com o átomo como um todo. Sua energia é transferida a um elétron, normalmente pertencente à camada mais interna do átomo. O elétron é arremessado com uma energia cinética E_c , dada por:

$$\boxed{E_c = h\nu - E_i} \quad 2.3$$

onde E_i é a energia de ligação do elétron orbital.

2.1.4.2 - Efeito Compton

No efeito Compton, o fóton primário pode interagir com qualquer um dos elétrons orbitais. Os elétrons são considerados livres pelo fato de ser a energia do fóton primário extremamente elevada comparada com a energia do elétron ligado. A energia do fóton primário é compartilhada entre o recuo do elétron e o fóton secundário.

2.1.4.3 - Produção de Pares

Neste efeito, o fóton primário desaparece e sua energia vai para a energia da massa de repouso e cinética dos pares pósitron (e^+) e elétron (e^-) que são criados.

2.1.5 - Nêutrons

O comportamento de nêutrons com a matéria é completamente diferente das outras partículas carregadas ou radiação gama. Desde que os nêutrons são partículas sem carga, nenhuma força Coulombiana existirá entre os nêutrons e elétrons orbitais ou núcleo de algum átomo.

Assim, para os nêutrons interagirem com a matéria, eles deverão entrar no núcleo ou aproximar muito deste núcleo para ser influenciado pelas forças nucleares.

A reação do nêutron com um núcleo pode ser representada como:



onde ${}^{A+1}_Z Y^*$ representa um núcleo composto em um estado excitado. A energia de excitação inclui tanto a energia de ligação quanto a energia cinética do nêutron.

O excesso de energia pode ser removido por meio de uma ou mais partículas. Se por exemplo, uma partícula alfa é emitida, a reação é designada como reação (n, α) .

O processo em que os nêutrons são remetidos é chamado de processo de espalhamento. O espalhamento é inelástico ou elástico, dependendo se o núcleo é deixado ou não num estado excitado.

Para um dado núcleo composto em um estado excitado, vários e diferentes tipos de reações nucleares podem ser energeticamente possíveis. As probabilidades para as várias reações dependem da quantidade de energia de excitação e a localização dos níveis de energia no composto e no núcleo resultante. Consequentemente, a probabilidade para cada tipo de processo de absorção depende da energia do nêutron incidente e a composição do absorvedor.

A seguir, é dada uma relação dos possíveis tipos de reações do nêutron com a matéria, bem como suas respectivas representações:

- Espalhamento elástico (n, n).
- Espalhamento inelástico (n, n); (n, n γ); (n, 2n).
- Captura simples (n, γ).
- Ejeção de partículas carregadas (n, p); (n, d); (n, α); (n, t);
- Fissão (n, f).
- Processos de Alta Energia ($E \cong 100$ MeV).

Algumas das reações nucleares acima citadas serão vistas em maiores detalhes em ocasiões oportunas.

2.2 DETECTORES DE RADIAÇÃO /5/

2.2.1 - Detectores a gás

Entre os detectores que empregam câmaras de gás, podemos citar as câmaras de ionização, os detectores proporcionais e os detectores Geiger Müller.

Todos eles funcionam através da ionização do gás. Em geral, estes detectores possuem uma câmara de forma cilíndrica preenchida com gás ou gases à baixa pressão e um fio bem isolado das paredes deste cilindro entre os quais se aplica uma diferença de potencial (Figura 2.1).

A radiação ao atravessar esta câmara, produz ionização no gás. Os pares de íons são coletados, dando origem a uma carga Q em cada um dos eletrodos.

Se a capacitância do sistema com relação à terra for C e a resistência R for suficientemente grande, a passagem da radiação originará um impulso $\Delta V = Q/C$.

A dependência do número de íons coletados com a voltagem V aplicada é dada pelo gráfico da Figura 2.2 que pode ser dividido em cinco regiões:

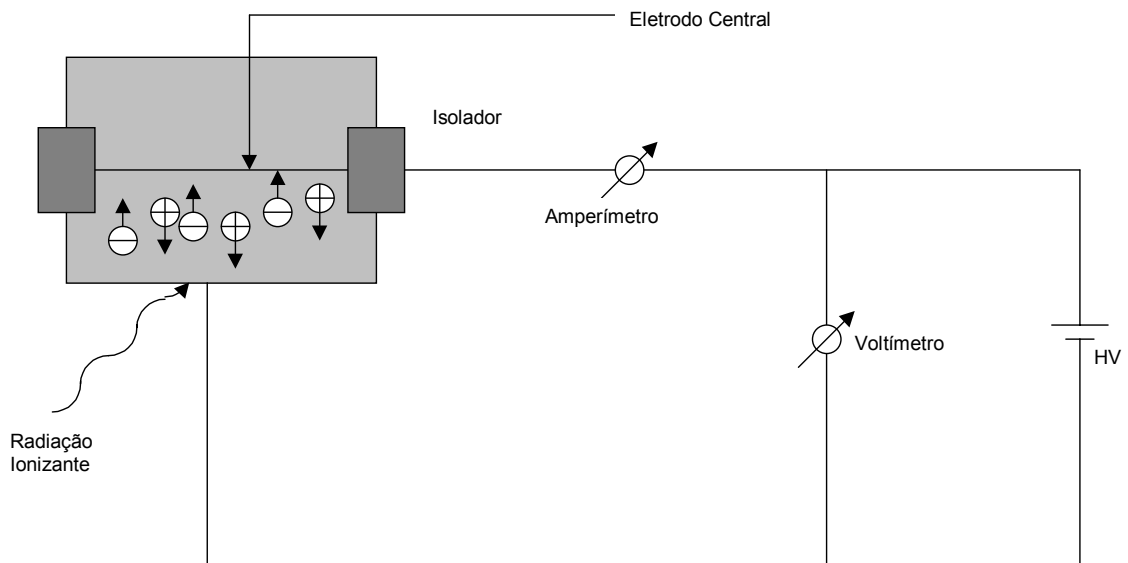


Figura 2.1: Esquema de um Detector a Gás.

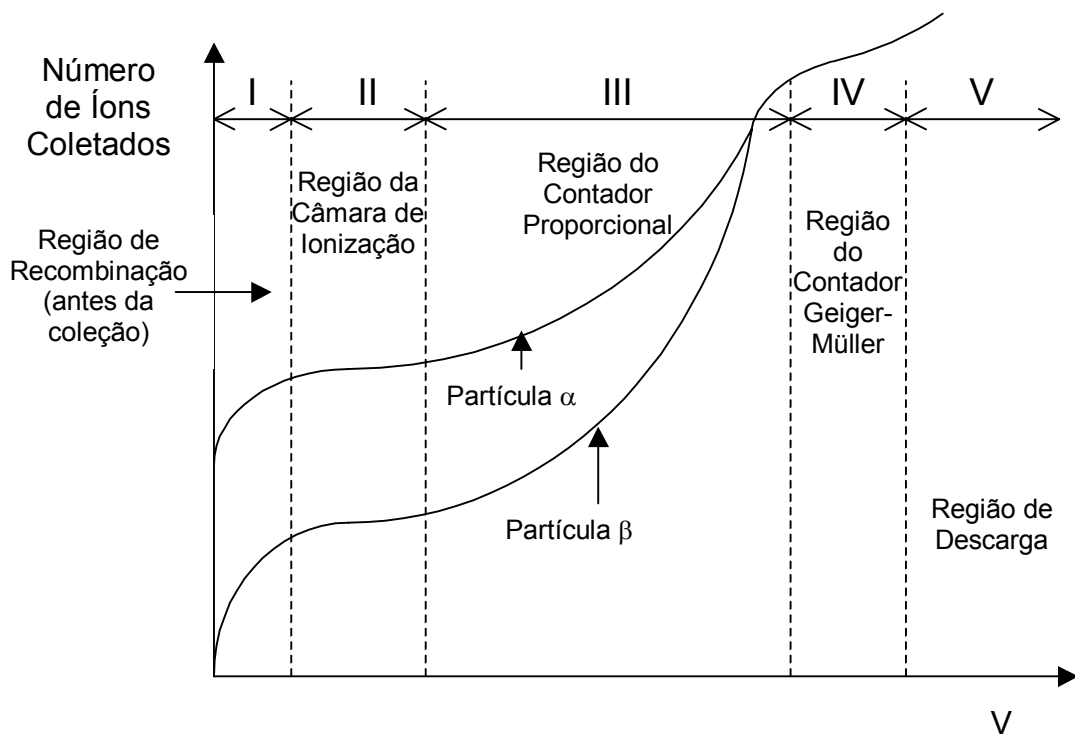


Figura 2.2: Altura de Pulso versus Voltagem Aplicada.

REGIÃO I (Região de Recombinação)

Nesta região há competição entre a perda de pares de íons por meio de recombinação e a coleção dos eletrodos. Quanto mais aumenta a voltagem V , maior

torna-se o campo elétrico entre os eletrodos e, portanto, diminui a probabilidade de recombinação das cargas.

REGIÃO II (Região da Câmara de Ionização)

Nesta região, a quantidade de carga coletada é dentro de certos limites, independente da diferença de potencial entre os eletrodos, porque a perda na recombinação é desprezível. Essa região é chamada de região da CÂMARA DE IONIZAÇÃO, pois, tais câmaras operam nessa região de voltagem.

Como pode ser visto na Figura 2.2, partículas mais ionizantes (a partícula alfa, por exemplo), produz mais íons (que as partículas beta, por exemplo) e, portanto, produz mais carga, ou seja, ΔV (pulso) será maior:

$$\boxed{\Delta V \propto \frac{Q}{C} \propto E} \quad 2.5$$

Portanto, a câmara de ionização mede energias e distingue os diversos tipos de partículas através dos sinais produzidos.

REGIÃO III (Região do Contador Proporcional)

Se a diferença de potencial entre os eletrodos for aumentada além do limite que caracteriza a Região II, verifica-se que a carga (ou corrente) aumenta linearmente com a tensão aplicada, por um intervalo razoavelmente grande de variação dessa grandeza. Essa região, conhecida pelo nome de proporcional, é caracterizada pelo fato de os elétrons produzidos pela passagem da partícula poderem adquirir uma energia suficiente para ionizarem os átomos por meio de colisão (ionização através de colisão). Este processo de aumento de carga é multiplicativo, os fenômenos que ocorrem nessa região são utilizados nos detectores denominados lineares ou proporcionais.

A radiação, quando atravessa o detector, produz pares de íons. Entretanto, esses íons possuem energia suficiente para produzirem novos pares. Há assim uma multiplicação do número de pares original. A carga coletada é a carga produzida

multiplicado por um fator M. Logo, continua válido que o sinal produzido tem altura proporcional à energia da radiação incidente ou à ionização produzida, ou seja:

$$\Delta V = \frac{MQ}{C} \quad 2.6$$

Os detectores proporcionais apresentam um sinal maior do que a câmara de ionização, pois a carga é multiplicada por um fator. Com esses detectores pode-se detectar radiação alfa em presença de radiação beta.

REGIÃO IV (Região do Geiger-Müller)

Nesta região, a carga coletada é independente da ionização que a iniciou. Esta é chamada região do detector Geiger-Müller (G-M).

REGIÃO V (Região de Descarga)

Nessa região, a diferença de potencial é tão grande que se obtém uma descarga contínua, a qual uma vez começada, continuará independente da radiação que incide.

2.2.1.1 - Câmaras de Ionização

Operam na região do próprio nome. Quando a radiação passa pelo gás do detector, produz pares de íons e apenas os pares produzidos são detectados.

Se, inicialmente, houver poucos pares, teremos pouca carga coletada. Se houver mais pares, teremos mais cargas. A quantidade de pares de íons produzidos depende da energia da radiação ser maior ou menor, ou mais ou menos ionizante. Como a altura do sinal de saída depende da carga coletada e esta dos pares originais de íons produzidos, temos então que:

$$\Delta V = \frac{Q}{C} \propto E \quad 2.7$$

A câmara mede energias e distingue os diversos tipos de partículas através da altura dos sinais produzidos. Na realidade, o que se mede não são pulsos, mas uma

corrente de saída proporcional ao número médio de partículas da fonte. O intervalo de corrente em que se mede varia de 10^{-6} a 10^{-16} A, sendo as de 10^{-16} A muito empregadas nos controles de reatores.

Tais câmaras são utilizadas para detecção de radiação gama, alfa, beta, nêutrons e fragmentos de fissão. A fonte radioativa pode ser colocada dentro da câmara, fora dela ou até mesmo misturada ao gás. Apesar de serem simples quanto ao funcionamento, produzem, no entanto, pulsos ou sinais de saída muito pequenos, isto porque apenas a carga produzida é coletada, e desse modo, poderão ser confundidos com o ruído eletrônico. Pode-se construir câmaras especiais para detecção de nêutrons, nos quais são colocados Boro-10 em placas. Um nêutron atingindo essas placas, produz a reação (n, α) e o α produzido ioniza o gás. Outras, ao invés de Boro-10, contém placas de urânio, nos quais ocorre a reação (n, f) e os fragmentos de fissão ionizam o gás.

2.2.1.2 - Detectores Proporcionais

A radiação, passando pelo gás do detector, produz pares de íons. No entanto, esses pares podem ter energia suficiente para produzir novos pares de íons. Ocorre, então, uma multiplicação do número de pares originais por um fator constante. Desse modo, é válido afirmar que o número original de pares é proporcional à energia, portanto a carga multiplicada por M fornece um pulso proporcional à energia. Desse modo:

$$\Delta V = \frac{MQ}{C} \propto E \quad 2.8$$

Os detectores proporcionais apresentam uma vantagem em relação às câmaras de ionização, quanto ao sinal de saída, que é maior pois a carga é multiplicada por um fator, sendo mais fácil fazer a discriminação contra o ruído.

Os detectores proporcionais podem ter alto ritmo de contagem, pois seu tempo morto é pequeno.

Os gases mais usados são: argônio + metana e isobutana + hélio.

Discriminam partículas alfa na presença de beta, pois as partículas alfa são muito mais ionizantes (Figura 2.3).

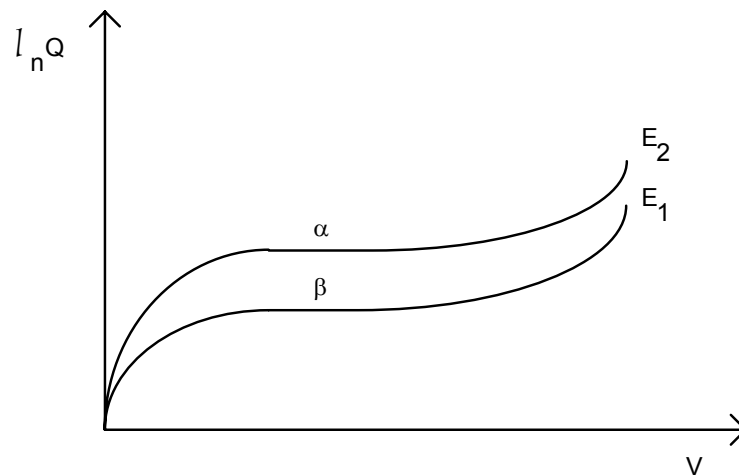


Figura 2.3: Comparação entre as cargas coletada oriundas de ionizações produzidas pelas partículas α e β em função da tensão aplicada aos eletrodos.

Os detectores proporcionais são quase sempre do tipo pulso, muito utilizados na forma chamada do tipo fluxo, ou seja, com o gás fluindo pelo tubo detector, entrando por um lado e saindo pelo outro.

Esses apresentam uma série de vantagens quanto à durabilidade, pois o gás é trocado continuamente; quanto à geometria, podem ser construídos de tal maneira que a fonte pode ser colocada dentro do detector, sendo muito importantes na determinação da atividade absoluta de uma fonte, ou seja, não do seu número de contagens mas do número real de desintegrações por segundo. Existem duas geometrias importantes: a do detector 2π e a do 4π (Figura 2.4).

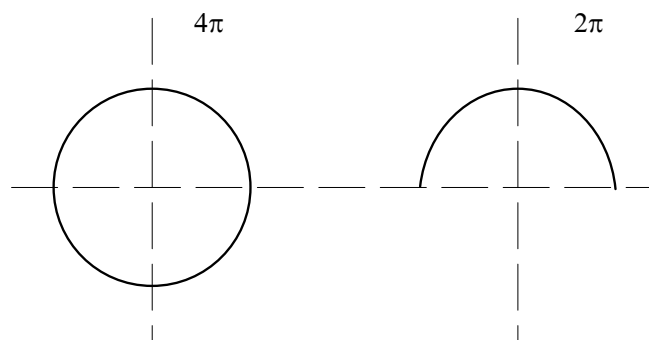


Figura 2.4: Geometrias dos Detectores.

2.2.1.3 - Detector Geiger

Neste caso, a radiação que passa pelo gás do detector produz pares de íons, mas a situação é tal que esses pares podem produzir novos pares, deixando-os ainda no estado excitado, esses por não poderem ficar assim, se desexcitam emitindo fótons. Esses fótons produzem no gás ou nas paredes dos tubos, elétrons por efeito fotoelétrico. Esses fótons são capazes de ionizar o gás novamente, e os pares produzidos podem produzir novos pares em estado excitado e, assim, o processo se repete, como um avalanche contínuo. Durante os processos, os íons negativos (elétrons) formados caminham para o ânodo, enquanto os íons positivos costumam em se dirigir para o cátodo e vão formando uma barreira entre os dois eletrodos, isto é, uma blindagem eletrostática. Assim, o campo elétrico abaixa, cessando a multiplicação, sempre que é atingida uma carga Q . Desse modo, não se pode saber pela altura do sinal de saída, qual o número de pares originais e, portanto, se a radiação é mais ou menos energética, pois fornece sempre o mesmo sinal:

$$\boxed{\Delta V = \frac{Q}{C}} \quad 2.9$$

onde Q é a carga final atingida. Se a radiação inicial for de baixa energia, custa muito para atingir a carga Q e se for de alta energia, é necessário uma multiplicação menor para atingir a carga Q .

Na análise mais detalhada do processo de multiplicação, surge o problema: os íons positivos que se formam são muitos e ao serem coletados eles podem arrancar elétrons, iniciando novamente o processo, pois se íons estão sendo coletados, o campo elétrico já se recuperou. Para evitar isso, mistura-se o gás do Geiger (argônio por exemplo) a um pouco de álcool, ou halogênio que se junta aos íons positivos formando íons complexos que se dissociam em moléculas mais simples ao serem coletadas, não sendo capazes de produzir nova ionização. Tal efeito é denominado de auto-extinção porque extingue a possibilidade do processo continuar indevidamente. Em alguns detectores essa extinção pode ser feita eletronicamente. A vantagem do uso do álcool é que ele é mais

efetivo do que o halogênio. Por outro lado, o álcool se gasta enquanto que o halogênio se recombina.

As vantagens do Geiger são: alta sensibilidade, pulso grande necessitando, portanto, equipamento eletrônico simples de baixo custo. Por outro lado, suas desvantagens residem no fato de não medir energia, não distinguir partículas e possuir tempo de resolução grande.

2.2.2 - Detectores de Cintilação

Certos materiais, às vezes impropriamente chamados fósforos, tem a propriedade de emitir luz quando absorvem radiação nuclear. Este método de detectar radiação através de cintilações é um dos mais antigos e a técnica que se utilizava era a visual, com o auxílio de uma ocular. Com o aparecimento da radioatividade artificial, este método se tornou impraticável devido às altas atividades de que podemos dispor, e foi abandonado tendo sido substituído pelos detectores à gás que então tiveram grande desenvolvimento.

Em 1947, com o aparecimento das válvulas fotomultiplicadoras que são capazes de contar as cintilações, este processo de radiação se tornou muito importante, sendo atualmente muito utilizado.

Os cintiladores possuem muitas vantagens sobre os detectores à gás: eles indicam não somente a presença de partículas, mas também registram a energia das partículas. Utilizando convenientemente a combinação de um cintilador e de uma fotomultiplicadora, o detector pode determinar ritmos de contagens bastante elevados.

A alta densidade dos cintiladores sólidos ou líquidos, faz com que eles sejam os detectores de raios gamas que apresentam maior eficiência. Podem ser utilizados para medir partículas alfa, beta, gama, prótons e existem até cintiladores especiais para nêutrons. Entretanto, os cintiladores são mais sensíveis à variações de tensão, devendo ser utilizados com equipamento eletrônico mais estável, e, portanto, mais caro.

2.2.2.1 - Funcionamento do Detector

A absorção de energia por uma substância e sua reemissão como radiação visível ou quase visível é conhecida como luminescência. No processo de luminescência, a excitação inicial pode ser proveniente de muitas origens: luz, reação química, aquecimento. As cintilações que acompanham a radiação nuclear tem origem na excitação e ionização produzidos no cintilador.

Se essa emissão de luz ocorre durante a excitação, num tempo menor que 10^{-8} seg, dizemos que o material é fluorescente. Se a emissão ocorre depois de cessada a excitação (depois de 10^{-8} seg), o processo é chamado fosforescência.

Na detecção por cintilação são utilizados materiais fluorescentes.

A radiação interage com o detector do que resulta a ionização e excitação dos mesmos e, portanto, a produção da luz.

Esta luz é transmitida eficientemente para o fotocátodo da válvula fotomultiplicadora diretamente ou por reflexão. Essa luz causa a emissão de fotoelétrons do fotocátodo. Estes elétrons são, por sua vez, acelerados e focalizados nos dinodos da válvula, através do campo elétrico produzido por uma diferença de tensão aplicada à válvula fotomultiplicadora (Figura 2.5).

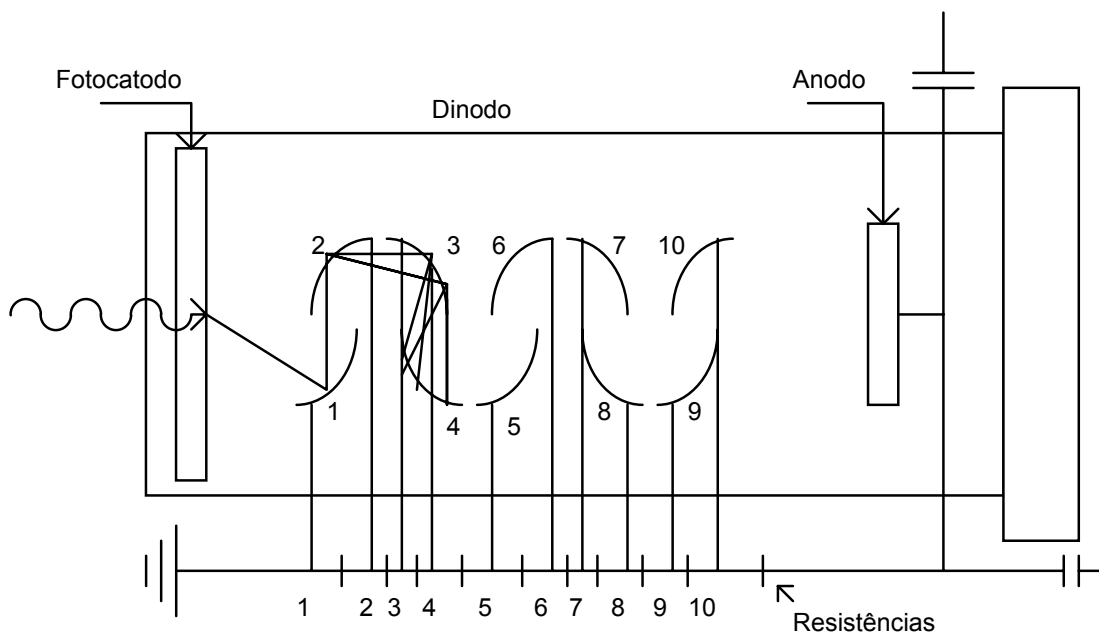


Figura 2.5: Válvula Fotomultiplicadora.

Cada elétron arranca de 3 a 5 novos elétrons, portanto, o ganho da corrente para uma fotomultiplicadora típica de 10 estágios é da ordem de 10^6 .

Quando os elétrons chegam ao anodo, a corrente flue através de uma resistência e causa uma queda na tensão através do equipamento, através de um capacitor C. Este pulso negativo tem, em geral, uma amplitude de poucos milivolts até volts.

O tempo de subida do pulso, isto é, o tempo para o pulso subir de 10 % a 90 % de sua máxima altura é determinado pela meia vida do estado excitado do cintilador que emite a luz e pelo tempo introduzido pela multiplicação dos elétrons.

2.2.2.2 - Tipos de Cintiladores

Os cintiladores podem ser sólidos, líquidos, gasosos e ainda o tipo orgânico ou inorgânico.

Entre os orgânicos temos o antraceno estilbeno que são sólidos. O tolueno + PPO (4) + POPOP (01) que é líquido. Entre os inorgânicos temos o NaI (Tl) (iodeto de sódio ativado com tálio), o LiI (Eu) (iodeto de lítio ativado com európio) o ZnS (Ag) (sulfeto de zinco ativado com prata) etc.

Os cintiladores líquidos estão sendo muito utilizados na determinação de espectros beta ou gama de baixa energia e também na determinação de atividade de fontes de baixa atividade.

2.2.3 - Detetores e Semicondutores

No caso dos cintiladores, verifica-se que, para uma mesma energia gama, fotopico é uma gaussiana razoavelmente larga, o que se deve ao fator estatístico na multiplicação dos elétrons, variação de sensibilidade do fotocátodo e dinodos, perda de parte da luz produzida pela homogeneidade do cristal, etc.

Como certos tipos de experiência, a resolução é extremamente importante, passou-se a utilizar os semicondutores como detetores de radiação.

A pesquisa a respeito dos semicondutores foi feita inicialmente com diamantes, a partir de 1945, sendo que a sua produção e utilização foram iniciadas

oficialmente em 1962. Nesta época inclusive, a eletrônica associada foi aperfeiçoada, sendo introduzidos amplificadores especiais de baixo ruído.

Os semicondutores são sólidos que, a temperatura de 0° K, são teoricamente isolantes perfeitos, mas com a elevação da temperatura, tornam-se maus condutores. O comportamento dos semicondutores pode ser entendido a partir da teoria das bandas de energia cujo estudo escapa à nossa finalidade.

Exemplos de detectores semicondutores:

- a. Detector de silício: dopado com fósforo e boro.
- b. Detector de germânio-lítio: dopado com gálio.

2.2.4 - Detectores Utilizados em Monitores Portáteis

Os detectores mais utilizados na prática em monitores portáteis encontram-se na Tabela 2.1, onde são mostradas as vantagens e as desvantagens entre eles.

2.3 MONITORES PESSOAIS DE RADIAÇÃO

2.3.1 - Filmes Fotográficos

Os filmes fotográficos foram um dos primeiros detectores de radiação utilizados, tendo a radioatividade natural sido notada através deste detector. Atualmente, é o método mais largamente utilizado para monitoração pessoal.

Esses detectores constituem-se de emulsões fotográficas, usualmente sobre uma base plástica e sua composição e processamento durante a manufatura, bem como certas técnicas especiais, permitem que eles sejam utilizados para todos os tipos de radiação.

Dividem-se essencialmente em duas categorias:

- a. Filme para raios X que podem ser calibrados para exposição à radiação X ou γ em termos de seu enegrecimento;
- b. Emulsões nucleares em plásticos ou placas de vidro usadas para se detectar os traços deixados por partículas ionizantes.

O elemento sensível à radiação nessas emulsões fotográficas é freqüentemente o brometo de prata. Pequenos cristais de brometo de prata cujo tamanho é menor do que 0,5 micron nas emulsões nucleares ou alguns microns nos filmes para raio X, são suspensos numa gelatina que é por sua vez depositada em acetato de celulose ou placas de vidro. A espessura dessas emulsões fotográficas varia de alguns microns (filmes pouco sensíveis para raio X) até 2000 microns (emulsões para detectar partículas carregadas).

Quando elétrons atravessam a emulsão fotográfica, ficam presos na rede cristalina provocando a redução de íons de prata atômica. Esses átomos de prata resultam em armadilhas ainda maiores, que capturam elétrons reduzindo mais íons de prata, formando eventualmente agregados microscópicos de átomos de prata que se constituem na imagem latente. Quando reveladas, as imagens latentes se reduzem a prata metálica que aparece ao olho humano como enegrecimento (se o filme for para raio X ou γ) ou como traços microscópicos (no caso de emulsões nucleares) os grãos de prata não revelados são dissolvidos por um fixador.

O filme enegrecido se colocado frente a uma fonte luminosa de intensidade I_0 absorverá parte dessa luz, deixando o filme com intensidade I . Define-se a densidade ótica D como:

$$D = \log_{10} \frac{I_0}{I} \quad 2.10$$

onde I_0 = intensidade de luz passando pelo filme não submetido à radiação, e

I = intensidade de luz passando pelo filme submetido à radiação.

A densidade ótica varia com a exposição ou dose e assim podem ser construídos os dosímetros fotográficos. É claro que a densidade ótica depende não só da dose, mas também da energia da radiação, direção de incidência, condições de revelação e tipo de filme utilizado (Figura 2.6).

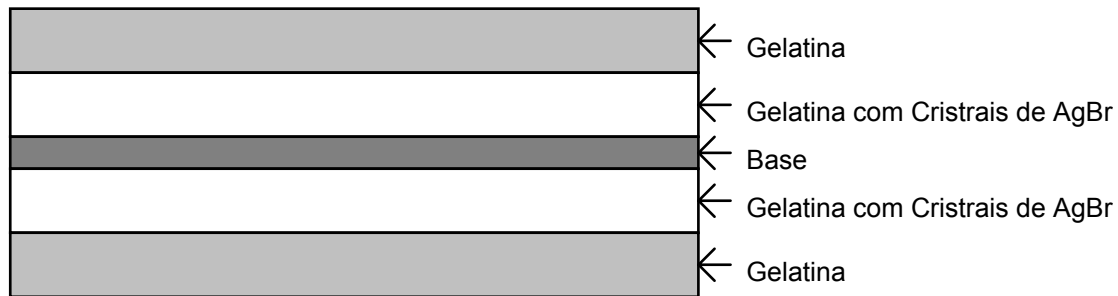


Figura 2.6: Composição do Filme Fotográfico.

2.3.2 - Dosímetros Termoluminescentes

Muitas substâncias exibem quando expostas à radiação a fosforescência e coloração, sendo que este fenômeno em cristais e vidros foi estudado durante muitos anos, tendo se iniciado por volta de 1950 já com finalidades dosimétricas.

Certas substâncias não normalmente luminescentes quando aquecidas podem se tornar luminescentes se forem pré-irradiadas com radiação ionizante. Estas constituem os chamados dosímetros termoluminescentes.

Quando a radiação ionizante incide num cristal iônico que contenha alguma impureza, este absorve parte da energia dessa radiação.

Posteriormente, se o cristal for aquecido, ele liberta essa energia sob forma de luz, sendo o fenômeno denominado termoluminescência.

A variação da quantidade de luz emitida com a dose de radiação permite que se construam dosímetros termoluminescentes.

A resposta dos dosímetros depende da energia da radiação incidente, tipo dessa radiação e naturalmente do cristal e das impurezas utilizadas. Podem ser utilizados para aplicação CaF_2 e LiF , sendo a CaF_2 mais sensível e o LiF apresentando menos variação da resposta em função da energia. Esses dosímetros são mais precisos em geral do que os filmes dosimétricos e as doses são lidas com erros de 10 a 30 %.

Uma dificuldade que surge no caso da aplicação dos dosímetros termoluminescentes é a variação (diminuição) da resposta durante a leitura.

Se deseja-se utilizar um dosímetro repetidas vezes para medidas não relacionadas, este fato é até uma vantagem. Porém se uma exposição por longo tempo com leituras intermediárias é necessária, então, este fato é desvantajoso.

2.3.3 - Caneta Dosimétrica

A caneta dosimétrica é uma câmara de ionização, contendo dois eletrodos, um dos quais é uma fibra de quartzo móvel em relação a uma presilha na qual é colocada. Fornecendo carga à presilha e acessórios, aparecerão forças repulsivas, afastando a fibra de quartzo. A ionização da câmara reduz a carga e conseqüentemente a fibra se move para a sua posição normal. O outro eletrodo é a própria parede interna do dosímetro.

Apresenta, ainda, a caneta dosimétrica, um sistema óptico e uma escala transparente que permitem as leituras diretas das doses recebidas pelo usuário.

O processo de medida com a caneta dosimétrica, é, portanto, muito simples: a radiação penetrante, causa ionização no meio interno; esta ionização descarrega o eletroscópio. A distância percorrida pela fibra em relação à escala graduada é proporcional à dose recebida na câmara.

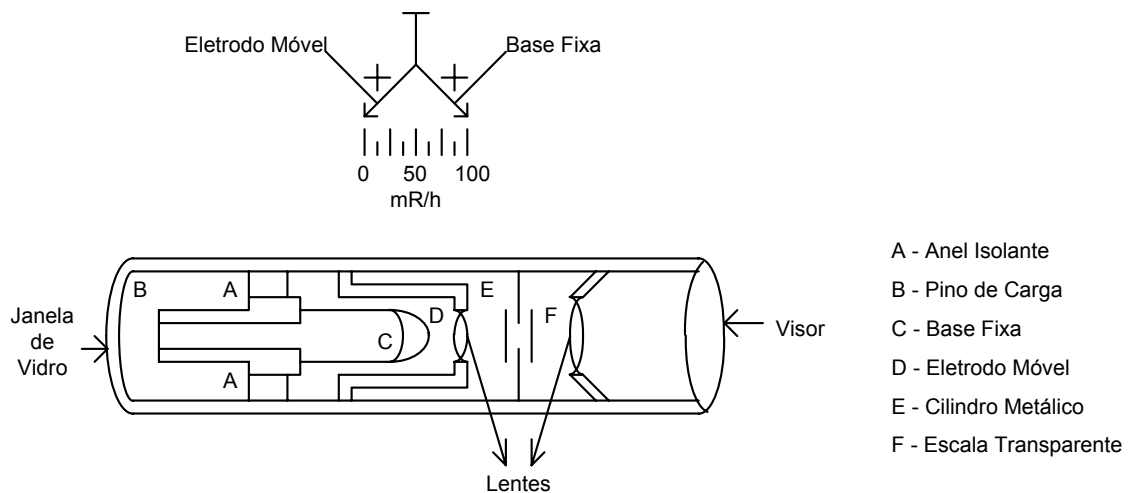


Figura 2.7: Esquema de uma Câmara de Ionização de Bolso.

Tipos	Tipos de Radiação	Vantagens	Desvantagens
1. Geiger Müller	β, γ	<ol style="list-style-type: none"> 1. Possui alta sensibilidade 2. Apresenta circuitos eletrônicos simples 3. Usados para monitorar de maneira grosseira baixos níveis de radiação apresentados normalmente por contaminações de superfícies. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Não discrimina energias 2. É difícil ajustar sua alta voltagem de operações 3. Possui grande tempo de resolução sendo impróprio medir altas taxas de contagens (ou níveis de radiação) 4. Pode-se saturar a altos níveis de radiação
2. Câmara de Ionização	β, γ, α e nêutrons	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apresenta grande intervalo de leituras de taxas de doses 2. Possui janela muito fina 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sensibilidade inferior ao GM 2. Requer considerável amplificação 3. Exige freqüentes ajustes na zeragem quando o amplificador não está adequadamente estabilizado 4. Monitora satisfatoriamente as taxas de doses provocadas por níveis intermediários e por altos níveis de radiação
3. Detector Proporcional	$\alpha, \beta, \gamma,$ nêutrons	<ol style="list-style-type: none"> 1. Permite discriminação entre vários tipos de radiação 2. Necessita de menor amplificação eletrônica do que câmara de ionização 3. Muito sensível 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Exige voltagem de operação estável
4. Cintilador	α, β e γ	<ol style="list-style-type: none"> 1. Permite espectrometria entre os vários tipos de radiação 2. Apresenta alta eficiência para detecção gama 3. Velocidade de contagem comparável ao detector proporcional 4. Pode ser adaptado à medidas de nêutrons 5. Há cintiladores específicos para detecção de partículas alfa, beta e radiação gama 	<ol style="list-style-type: none"> 1. É difícil ajustar a sua voltagem de operação como no caso do GM 2. Mais frágil que o GM à choques mecânicos 3. Apresenta custo de aquisição superior aos demais detectores

Tabela 2.1: Detectores mais usados em monitores portáteis.

2.4 DETECTORES DE NÊUTRONS

Como os nêutrons não são diretamente ionizantes, são utilizados processos intermediários que resultam em ionização para sua detecção.

Existem vários processos de interação dos nêutrons com a matéria e dependendo do material no qual o nêutron sofre interação e da energia do nêutron, um dos processos pode predominar sobre os outros, ou seja, a seção de choque é maior. Um dos efeitos que não deve ser esquecido quando se trata de nêutrons é a moderação, pela qual os nêutrons interagem com materiais leves e perdem energia mudando da categoria de rápido a epitérmico e posteriormente a lento ou térmico, quando apresenta alta seção de choque para a reação (n, γ) .

Entre os detectores de nêutrons encontram-se as câmaras com ^{10}B , as câmaras de ionização compensadas (CIC) e as câmaras de fissão.

2.4.1 Câmaras com ^{10}B

As câmaras com ^{10}B baseiam-se na reação $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$. Esta é uma reação que possui uma alta seção de choque para nêutrons térmicos. Ela tem a vantagem de poder ser detectada na presença de um fluxo alto de radiação gama, pois as partículas alfa são muito mais ionizantes do que os raios gama e produzem portanto pulsos maiores de modo a permitir uma discriminação da radiação gama. Os detectores mais comuns baseados nessa reação são os de BF_3 (~19% de ^{10}B). São detectores proporcionais nos quais o gás é o trifluoreto de boro. Sua forma mais comum é a cilíndrica com fio central e pressão do gás variável. Apresentam tempo morto pequeno. Para a detecção de nêutrons rápidos, o detector é envolvido com parafina para ocorrer a moderação dos nêutrons e permitir sua detecção.

2.4.2 Câmaras de Ionização Compensadas (CIC)

Este tipo de detector é utilizado quando há competição entre campos de radiação gama e de nêutrons. Esta condição é encontrada em núcleos de reatores operando em faixas intermediárias de potência.

As Câmaras de Ionização Compensada utilizam dois volumes sensíveis e concêntricos. Um destes volumes é revestido com Boro ("Boro Lined"), sendo sensível à nêutrons e aos gamas. O outro volume, sem o revestimento com Boro, é sensível apenas à radiação gama.

Na Figura 2.8. tem-se o esquema elétrico de uma Câmara de Ionização Compensada.

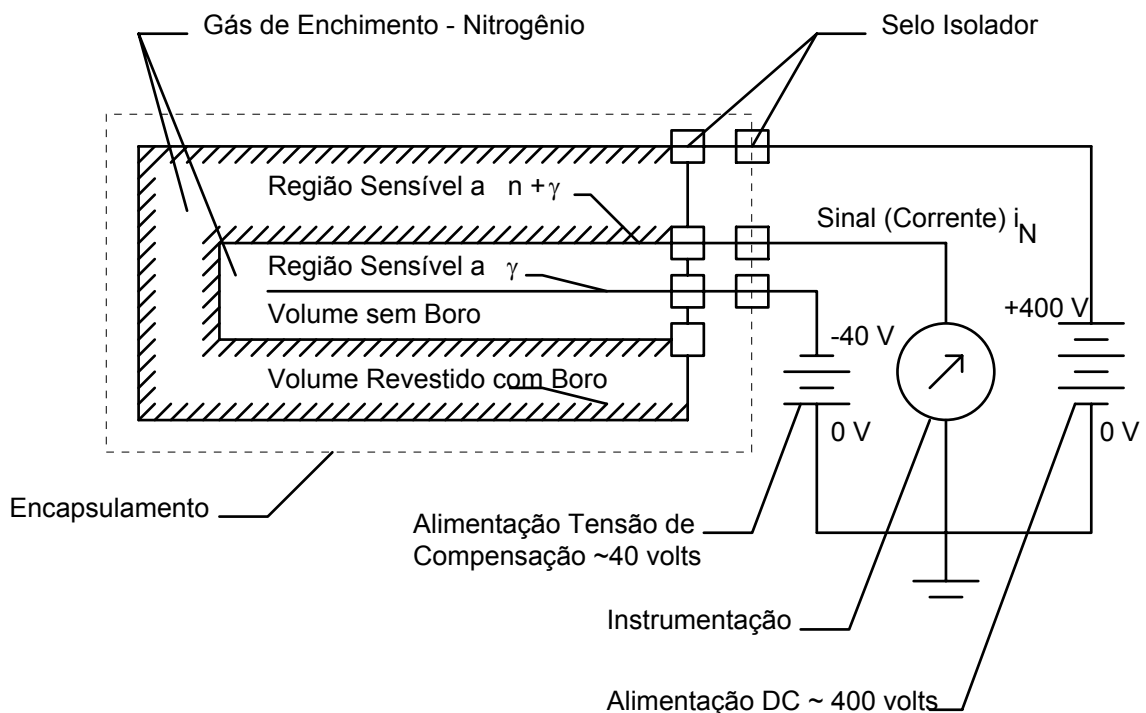


Figura 2.8: Esquema Elétrico de uma Câmara de Ionização Compensada.

Como os dois volumes sensíveis são montados concêntricamente, teoricamente ficam submetidos ao mesmo campo de radiação (nêutrons e gamas).

Aplicando uma tensão negativa (~ 40 volts) no eletrodo central, a corrente gerada pela radiação gama no volume interno irá "compensar" ou cancelar o sinal provocado pela radiação gama gerada no volume externo.

Sendo $i(n)$ e $i(\gamma)$ as correntes geradas respectivamente por nêutrons e gamas, temos que:

$$\boxed{i(n) + i(\gamma) - i(\gamma) = i(n)} \quad 2.11$$

Ou seja, a corrente "líquida", gerada pela Câmara de Ionização Compensada será proporcional apenas à intensidade do campo de nêutrons. Como na prática é impossível a construção de dois volumes concêntricos que tenham a mesma sensibilidade ao campo de radiação gama, há necessidade de ajustes para igualar os sinais provocados pelos gamas nos dois volumes da câmara. Este ajuste normalmente é realizado variando-se a tensão negativa aplicada no volume sensível apenas à radiação gama. Na Figura 2.9. pode-se observar os efeitos dos ajustes de compensação no sinal de resposta das Câmaras de Ionização Compensada.

Na situação de "subcompensada", isto é, a câmara está sendo sensibilizada pela radiação gama, o sinal de saída indicará uma taxa de crescimento da população neutrônica maior que a real. Por outro lado, na situação de "supercompensada" uma parte da corrente produzida pelo campo neutrônico será subtraída, indicando uma taxa de crescimento da população neutrônica menor que a real.

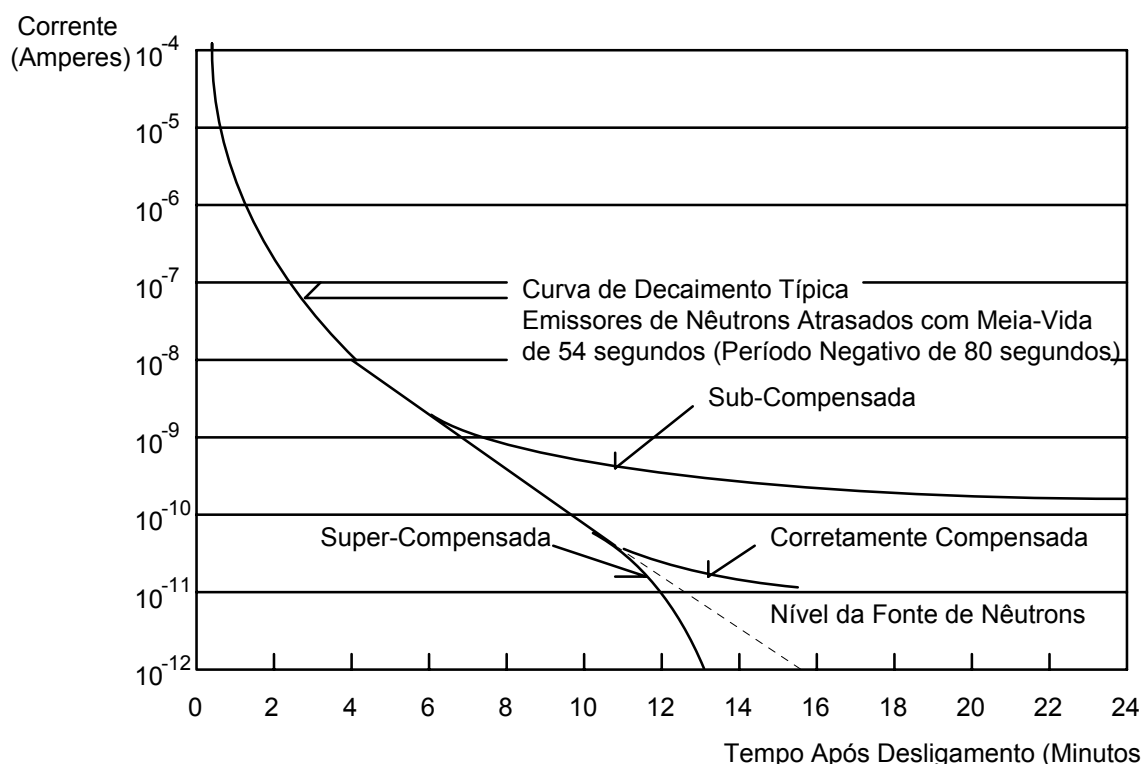


Figura 2.9: Curva de Compensação-Gama Típica para uma CIC.

2.4.3 Câmaras de Fissão

Nas câmaras de fissão os materiais físeis como ^{238}U , ^{235}U , ^{239}Pu e ^{232}Th são incorporados a câmaras de ionização. Os nêutrons incidentes produzem fissão e os fragmentos produzidos, altamente ionizantes, produzem pulsos. O material físsil é utilizado sob a forma de gás ou depositado em fios ou placas. Os gases que contém urânio são, em geral, muito corrosivos, dando-se preferência aos sólidos. Um dos problemas deste tipo de detector é que os materiais físeis são radioativos naturais, que emitem radiação alfa. Se o número de partículas alfa emitidas for muito grande, elas podem atrapalhar a medida, sendo confundidas com os sinais dos fragmentos de fissão.

Quando o fluxo de radiação for extremamente alto, pode-se usar os termopares especiais, que se baseiam no efeito termoelétrico. Quando dois materiais diferentes são ligados e as duas junções são mantidas a temperaturas T_1 e T_2 a diferença de potencial que surja entre elas é proporcional à diferença de temperatura do termopar. No caso do detector para nêutrons, uma das junções é recoberta por ^{235}U ou ^{10}B , sendo que o ^{235}U tem a desvantagem de se tornar radioativo.

QUESTÕES DO CAPÍTULO 2

- 2.1 Calcular o número de pares de íons formados pela passagem de uma partícula alfa de 5 MeV numa câmara de ionização (contendo ar) e a carga elétrica total destes pares de íons, sabendo que a ionização específica no ar é de 35,5 eV.
- 2.2. Determinar o alcance de uma partícula α no ar sabendo que sua energia é de 4 MeV.
- 2.3. Determine a energia mínima que uma partícula alfa deva ter para que seja ainda contada num tubo Geiger-Müller supondo que a parede deste tubo é de 2 mg/cm^2 .

$$\text{Dado: } R_{ac\acute{o}} (cm) \cong 3,2 \times 10^{-4} \frac{\sqrt{A_{a\acute{c}o}}}{\rho_{a\acute{c}o} (g/cm^2)} R_{ar} (cm)$$

$$\text{usar: } R_{a\acute{c}o} \cdot \rho_{a\acute{c}o} = 2 \times 10^{-3} (g/cm^2)$$

$$A_{a\acute{c}o} = 56$$

- 2.4. As partículas Beta oriundas de uma fonte de P-32 são contadas por meio de um Geiger-Müller tendo parede de espessura de 30 mg/cm^2 . Estimar a fração de partículas que é absorvida no detector.

$$\text{Dados: fração absorvida} = 1 - e^{-\mu_m d}$$

$$\text{onde } \mu_m = \frac{17}{E_m^{1,14}} \text{ com } \mu_m \text{ em } (\text{cm}^2/\text{g}).$$

OBS.: O valor de E_m pode ser obtido de uma referência qualquer.

- 2.5. Qual a dependência do alcance do elétron em função do número atômico do absorvedor quando este alcance é expresso em g/cm^2 ?
- 2.6. O que é radiação fluorescente?
- 2.7. Quais os mecanismos de interação da radiação gama com a matéria? Explique cada um deles.
- 2.8. Esboce um gráfico do coeficiente de atenuação linear em função da energia para o chumbo (Veja no livro Price). Identifique as faixas de energias em que cada um dos efeitos predomina. Para que energia a atenuação conjunta (3 mecanismos) é mínima?
- 2.9. Repita agora o problema 2.8 para o ar levando em conta o espalhamento Compton. Não considere o espalhamento de Rayleigh. (Atenção: agora o coeficiente de atenuação é o de massa e a referência é a mesma do problema citado).
- 2.10. Explique qual a condição para que ocorra o mecanismo de produção de pares na interação da radiação gama com a matéria.
- 2.11. Numa interação do nêutron com a matéria, onde um nuclídeo composto é formado, permanecendo num estado excitado, qual é o tempo em que tal núcleo permanece neste estado e o que ocorre posteriormente com este núcleo excitado?
- 2.12. O que se entende por fragmentos leves e pesados num produto de fissão?
- 2.13. Quais os aspectos que diferem uma interação da radiação alfa e fragmentos de fissão com a matéria?
- 2.14. O cálculo do alcance de um produto de fissão é complicado devido aos fatos do decréscimo da carga líquida da partícula e por colisões nucleares. No entanto,

medidas experimentais sugerem uma expressão do tipo $R \text{ (mg/cm}^2\text{)} = K.E^{2/3}$, onde E é a energia cinética do produto de fissão (em MeV) e K vale 0,14; 0,19 e 0,50 [$\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{MeV}^{2/3})$] para o ar, alumínio e ouro, respectivamente. Determine qual o alcance em mg/cm^2 de um fragmento de fissão de 1 MeV.

2.15. A taxa de reação para a qual a reação (n, α) ocorre num tubo contador de nêutron, exposto a um campo neutrônico é dada por $R = \Sigma\Phi = VN\sigma\phi$. Sabendo que os nêutrons são térmicos e de magnitude da ordem de 10^{12} n/cm^2 que o volume do tubo é de 100 cm^3 ; que σ é de cerca de 700 barns ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) e o número de átomos por cm^3 é $2,68 \times 10^{19}$, determine a taxa de reação.

2.16. O livre caminho médio de um nêutron é dado por $\lambda = 1/\Sigma$. Calcular o livre caminho médio de um nêutron térmico no cádmio.

Dados: densidade do Cd = $8,6 \text{ g/cm}^3$.

número de massa do Cd = 113.

seção de choque $\sigma = 2600 \text{ barns}$.

2.17. Qual é o princípio de funcionamento de detector à gás?

2.18. Quais são os detectores à gás mais comuns?

2.19. Esboce um gráfico de altura de pulso versus tensão aplicada a um detector à gás, considerando primeiro uma fonte β emissora e α emissora. Explique os fenômenos que ocorrem durante a elevação da tensão aplicada.

2.20. No gráfico anterior pode-se identificar cinco regiões. Dê o nome de cada uma delas e suas características.

2.21. Qual a principal característica que difere uma câmara de ionização e um detector proporcional?

3.22. Qual a principal característica que difere o Geiger de outro detector à gás?

2.23. Explique porque num geiger não se pode conhecer o número de pares originais em função da altura do sinal de saída.

- 2.24. Esboce um esquema de um detector à gás e explique sucintamente seu funcionamento.
- 2.25. Explique o efeito de auto extinção que ocorre nos Geigers contendo halogênio misturado ao gás.
- 2.26. O que é um detector de cintilação e como funciona?
- 2.27. O que é uma válvula fotomultiplicadora? Qual é o fator de multiplicação aproximado para 10 estágios?
- 2.28. Cite tipos de cintiladores. Quais destes são os mais comuns?
- 2.29. Explique e dê exemplos de detectores semicondutores.
- 2.30. Quais as vantagens de um detector proporcional em relação a uma câmara de ionização e a um Geiger?
- 2.31. Cite uma vantagem e uma desvantagem bem característica de um cintilador em relação a outros detectores.
- 2.32. Explique como funciona um detector tipo filme fotográfico.
- 2.33. Como funciona um dosímetro termoluminescente?
- 2.34. Explique o funcionamento de uma caneta dosimétrica.
- 2.35. Pesquise:
- medidas de coincidência.
 - elabore um diagrama de bloco para um sistema de detecção de radiação nuclear para contagem de partículas.
 - gráfico da seção de choque do cádmio 113 em função da energia: observe um grande pico na região bem abaixo da ressonância e determine a energia correspondente a este pico.
 - gráfico da seção de choque do boro, no que ela difere do cádmio.
 - fale sobre a reação (n, α) no ${}^{10}_5B$.