

4323301 – Física Experimental C

Coeficiente de Atenuação dos Raios Gama

Grupo:

| Nome | No. USP | No. Turma |
|------|---------|-----------|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

OBJETIVOS -

Medir curvas de atenuação de Raios γ com energias de fóton diferentes, usando dois tipos de absorvedores (^{27}Al , $Z=13$, $\rho=2,697\text{g/cm}^3$ e ^{208}Pb , $Z=82$, $\rho=11,340\text{g/cm}^3$). Observar as regularidades da radiação gama com a matéria: 1) a lei de atenuação exponencial, 2) o decréscimo do coeficiente de atenuação com o aumento da energia dos raios γ , 3) o aumento do coeficiente de atenuação com o número atômico do absorvedor.

TAREFAS –

- 1- Determinar a tensão de operação do detector Geiger através do gráfico de Contagens x Tensão (com os erros de medida);
- 2- Medir as curvas de atenuação da radiação gama emitida pelos núcleos de ^{137}Cs (Césio 137) e ^{60}Co (Cobalto 60), utilizando alumínio e chumbo;
- 3- Testar a validade da lei de atenuação exponencial;
- 4- Pela comparação dos coeficientes de atenuação mássicos, determinar, se possível, o mecanismo de interação dominante.

PERGUNTAS –

P1- Defina resumidamente os principais processos de interação entre raios gama e a matéria: Espalhamento Compton, Efeito Fotoelétrico e Criação de Pares.

P2- Explique resumidamente o conceito de seção de choque.

P3- Defina resumidamente o conceito de coeficiente de atenuação e de meia espessura.

TIPOS DE RADIAÇÃO IONIZANTE –

Radiação ionizante é um fluxo de partículas subatômicas (fótons, elétrons, pósitrons, prótons, nêutrons, núcleos, etc..) que causam ionização dos átomos do meio no qual essas partículas atravessam. Ionização significa a remoção de elétrons dos átomos desse meio. Para se remover um elétron de um átomo certa quantidade de energia deve ser transferida para o mesmo. De acordo com a lei de conservação de energia, esta quantidade deve ser igual à diminuição da energia cinética da partícula que causa a ionização. Portanto, a ionização se torna possível somente quando a energia das partículas incidentes (ou partículas secundárias que possam advir de interações das partículas incidentes com a matéria) exceda certo valor de limiar – a energia de ionização do átomo -. As energias de ionização são usualmente da ordem de 10eV.

A radiação ionizante pode ocorrer de várias formas na natureza. A ionização direta é composta de partículas carregadas de alta energia, as quais ionizam os átomos do material por interação Coulombiana com seus elétrons. Tais partículas são, por exemplo, elétrons e pósitrons (radiação beta) de alta energia, núcleos de ^4He de alta energia (radiação alfa), etc.. Ionização indireta é composta de partículas neutras que não ionizam os átomos diretamente ou, pelo menos, não com muita frequência, mas devido a interações destas com a matéria partículas carregadas de alta energia são emitidas ocasionalmente. Estas últimas, sim, ionizam os átomos diretamente. Exemplos de ionização indireta são fótons de alta energia (UV, raios X e radiação gama) e nêutrons de qualquer energia.

As energias das partículas de vários tipos de radiação ionizante são dadas nas tabelas 1 e 2 abaixo.

Tabela1 – Comprimentos de onda da radiação eletro-magnética

| Região Espectral | Faixa de Comprimento de Onda | Faixa de Energia dos Fótons |
|---|--|--|
| Ondas de Rádio | 100.000km – 1mm | $1 \times 10^{-14}\text{eV}$ – $1 \times 10^{-3}\text{eV}$ |
| Raios Infra-Vermelhos | 1mm – 0,75 μm | $1 \times 10^{-3}\text{eV}$ – 1,7eV |
| Luz Visível | 0,75 μm – 0,4 μm | 1,7eV – 3,1 ^3eV |
| Radiação Eletromagnética ionizante | | |
| Luz Ultra Violeta | 0,4 μm – 10nm | 3,1eV – 100eV |
| Raios X | 10nm – 0,001nm | 100eV – 1MeV |
| Raios Gama | <0,001nm | >10keV |

Tabela2 – Comprimentos de onda da radiação de partículas

| Tipo de Radiação | Faixa de Energia dos Fótons |
|---|-----------------------------|
| Partículas α (^4He) | 4MeV – 9MeV |
| Partículas β (elétrons e pósitrons) | 10keV – 10MeV |
| Nêutrons Térmicos | <0,4eV |
| Luz Ultra Violeta | 0,4eV – 200keV |
| Raios X | >200keV |
| Raios Gama | 1MeV – 100MeV |

O mecanismo de interação das partículas com a matéria depende da natureza das partículas (especialmente de sua massa e carga elétrica). De acordo com a maneira pela qual as partículas interagem

com a matéria, quatro grupos distintos de partículas podem ser definidos:

- 1) Partículas pesadas carregadas (como partículas alfa e núcleos);
- 2) Partículas leves carregadas (como elétrons e pósitrons);
- 3) Fótons (neutros);
- 4) Nêutrons (partículas pesadas neutras);

Este experimento concerne apenas ao terceiro tipo de partículas mencionado.

INTERAÇÃO DE RAIOS GAMA COM A MATÉRIA –

Como no caso de partículas carregadas, a interação de fótons de radiação gama com a matéria é de natureza eletro magnética. Entretanto, o mecanismo físico exato desta interação é bem diferente que no caso das partículas carregadas, devido:

- 1- Fótons não carregam carga elétrica, portanto não participam de interações Coulombianas. A seção de choque para interação dos fótons é muito menor que a seção de choque para partículas carregadas.
- 2- A massa de repouso dos fótons é zero, portanto sua velocidade é sempre igual à velocidade da luz. I.e., fótons não podem ser freados na matéria, somente espalhados ou absorvidos.

A **absorção de fótons** é um processo de interação onde o fóton desaparece e toda sua energia é transferida para os átomos do material ou a partículas secundárias. O **espalhamento de fótons** é um processo de interação onde o fóton não desaparece, mas muda a direção de propagação. Em adição, o fóton espalhado pode transferir parte de sua para um átomo ou elétron do material. Existem dois tipos de interação onde o fóton é absorvido e vários tipos para espalhamento (nos quais um tipo é muito mais importante que os outros). Estes processos são definidos abaixo.

Espalhamento Compton

Do ponto de vista da mecânica quântica, o espalhamento é um evento onde ocorre a colisão entre duas partículas - um fóton e um elétron ou um fóton e um átomo. Pelas leis de conservação de energia e momento segue-se que devido ao espalhamento pelos elétrons do material a energia do fóton precisa diminuir (parte da energia é transferida para os elétrons). Este efeito foi descrito pela primeira vez em 1922 pelo físico americano A. Compton, tornando-se um dos pilares da mecânica quântica, pois provava que, em certas condições, a radiação eletromagnética se comportava como partículas. O espalhamento Compton é o mecanismo de espalhamento dominante nos processos de interação da radiação com a matéria.

Como, para um único espalhamento Compton sendo resultado da interação de um fóton com um elétron, a seção de choque Compton atômica σ_c é igual à seção de choque Compton eletrônica σ_{ce} vezes o número de elétrons no átomo (igual ao número atômico Z):

$$\sigma_c = Z\sigma_{ce} \quad (1)$$

Por definição σ_{ce} não depende do Z. Então a seção de choque para o espalhamento Compton atômico é diretamente proporcional à Z. Quando a energia do fóton é suficientemente alta (~100keV ou

mais), σ_{ce} diminui com o aumento da energia do fóton.

Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é um tipo de interação de um fóton com um átomo onde o átomo absorve toda a energia do fóton (o fóton desaparece). E um dos elétrons é removido do átomo. Este elétron é chamado de fotoelétron. A seção de choque para o efeito fotoelétrico é caracterizada por uma forte dependência com o número atômico Z e a energia do fóton, sendo aproximadamente igual a:

$$\sigma_f \sim 10^{37} Z^5 / (h\nu)^{7/2} \quad (2)$$

onde a seção de choque σ_f é expressa em m^2 e $h\nu$ é a energia do fóton em Mev. Temos de (2) que a seção de choque para o efeito fotoelétrico aumenta rapidamente com o aumento do número atômico Z e diminui com a energia do fóton $h\nu$.

Produção de pares elétron-pósitron

No campo elétrico de um núcleo atômico, um fóton pode desaparecer transformando toda sua energia em energia relativística entre duas novas partículas – um elétron livre e um pósitron (anti partícula do elétron). Como a energia de recuo do núcleo é praticamente desprezível, a lei de conservação da energia durante um evento deste tipo pode ser escrita como:

$$h\nu = m_+c^2 + m_-c^2 \quad (3)$$

onde m_+c^2 e m_-c^2 são as energias relativísticas totais do pósitron e do elétron. Como m_+ e m_- são sempre maiores que a massa de repouso do elétron m_0 , vem de (3) que a produção de pares só é possível quando a energia do fóton é maior que duas vezes a energia de repouso de um elétron: $2m_0 \sim 1,02\text{Mev}$. Esta é chamada de “energia de limiar” para produção de pares. Apesar deste processo ser possível, a seção de choque para produção de pares, σ_p , excede a seção de choque para espalhamento Compton, σ_c , somente quando a energia do fóton se aproxima e excede de 10Mev.

Coefficiente de atenuação

A seção de choque total para a interação da radiação gama com um átomo é igual à soma de todas as três seções mencionadas anteriormente:

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_f + \sigma_p \quad (4)$$

Dependendo da energia do fóton e do material absorvedor, uma das três seções de choque parciais poderão tornar-se dominantes. Na Figura 1 apresentamos os intervalos de energia do fóton $h\nu$ em função do número atômico Z, correspondendo ao caso onde um dos três processos torna-se dominante.

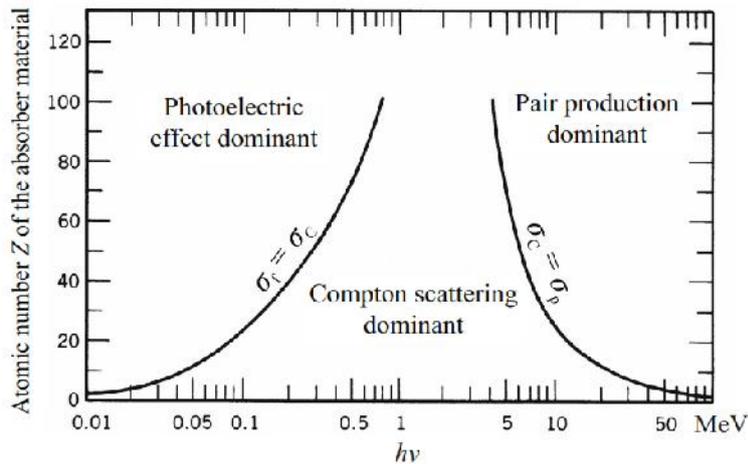


Fig. 1 Importância relativa dos vários processos de interação da radiação gama com a matéria.

Usando a definição de interação de seção de choque, é fácil derivar a dependência da intensidade radiação gama com a espessura do material absorvedor. Supondo um feixe estreito e paralelo de radiação gama atingindo normalmente uma camada de material absorvedor e que o detector registre somente os fótons que passaram através desta camada, sem qualquer tipo de interação com o material, então a dependência da intensidade da radiação medida I após a camada de espessura x é exponencial:

$$I(x) = I_0 e^{-(\sigma n x)} \quad (5)$$

Onde I_0 é a intensidade do feixe incidente, e n é a concentração atômica no material. Esta igualdade pode ser escrita da seguinte maneira:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (6)$$

onde μ é o coeficiente de atenuação:

$$\mu = \sigma n \quad (7)$$

A função exponencial (6) é mostrada nos gráficos da Figura 2. Na Figura 2b é sugerido o método de medida do coeficiente de atenuação μ : ele é obtido pelo ajuste linear da dependência do logaritmo da intensidade com a espessura do material absorvedor.

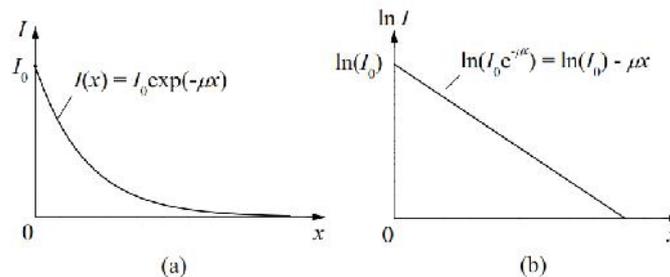


Fig. 2 Dependência da intensidade da radiação (a) e seu logaritmo (b) com a espessura do absorvedor.

Como a seção de choque total da interação é a soma das seções de choque para os três tipos de interação o coeficiente de atenuação μ pode ser expresso como a soma parcial dos três coeficientes correspondentes de cada processo (Figura 3).

$$\mu = \mu_c + \mu_f + \mu_p \quad (8)$$

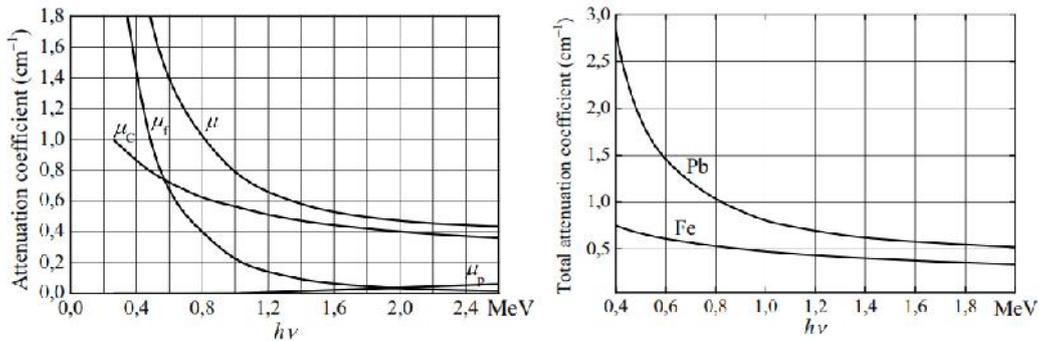


Fig.3 Dependência dos coeficientes de atenuação “parcial” para o chumbo (esquerda) em função da energia do fóton e coeficientes de atenuação total para o chumbo e ferro (direita).

Quando caracterizamos um material absorvedor é mais conveniente usar, em alguns casos, o assim chamado “coeficiente de atenuação mássico” ao invés do coeficiente de atenuação definido acima. Este coeficiente de atenuação mássico é definido como:

$$\mu_m = \mu/\rho \quad (9)$$

Se o **espalhamento Compton é o processo dominante** de interação, então os diferentes absorvedores são **caracterizados por coeficientes de atenuação mássicos aproximadamente iguais**. onde ρ é a densidade do material. Isto é devido às seções de choque do espalhamento Compton serem proporcionais ao número atômico Z , fazendo com que o coeficiente de atenuação também seja proporcional à densidade ρ do material.

PROCEDIMENTO DE MEDIDA –

Muito embora se trate de uma experiência simples, há uma grande vantagem no arranjo experimental, que é bastante versátil, permitindo trabalhar diversos parâmetros ou, em outras palavras, avaliar – mesmo que qualitativamente - a otimização de instrumentação, fonte de erros, etc. Utilize as informações comentadas em classe para guiar a montagem do experimento.

Após a montagem inicial:

1. Faça uma varredura das tensões no detector em função das contagens para uma das fontes radioativas. Lembre-se de manter o tempo de aquisição fixo.
2. Crie o gráfico (o programa Origin está disponível no computador do laboratório e o arquivo Poli 1.opj, na área de trabalho, apresenta resultados anteriores) de contagens em função de tensão e determine a região onde a variação nas medidas é menor (região de operação).

- Refaça (se julgar necessário) o arranjo experimental considerando que agora você precisa de espaço para adicionar suas amostras de Al ou Pb

3. Com o detector na tensão de operação escolhida, faça medidas com o detector em três condições distintas: sem a inserção de fonte radioativa e material (radiação de fundo), sem o material (radiação incidente) e com este.

4. Varie as medidas alterando a espessura do material absorvedor – não esqueça que não só a espessura do material precisa ser medida como também o respectivo erro calculado.

5. Crie o gráfico – linear e log - (arquivo Poli 2.opj do programa Origin) de contagens em função da espessura, não esquecendo de subtrair as contagem de radiação de fundo, para chumbo e alumínio.

ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS –

1 – Obtenha os valores do coeficiente de atenuação mássico obtidos pelo gráfico, após ajuste da curva, utilizando os valores da densidade dos absorvedores fornecidos no início da apostila;

2 – Determine os valores reais dos coeficientes de atenuação mássico da Figura 4 e compare com os obtidos experimentalmente. Para utilização da Figura 4 a energia do fóton precisa ser conhecida. ^{137}Cs emite fótons com energia de 0,622MeV. ^{60}Co emite fótons com duas energias próximas de 1,33MeV e 1,17MeV. Neste caso a energia a ser considerada para obtenção do valor de μ deverá ser a média das duas (1,25MeV).

3 – Com os dados obtidos pelos gráficos forneça os valores de espessura de Pb e Al , nos quais a intensidade do sinal cai pela metade para cada uma das fontes de radiação gama.

4 – Discuta as regularidades e as compare com a teoria (observar as tarefas 1, 2, 3 e 4).

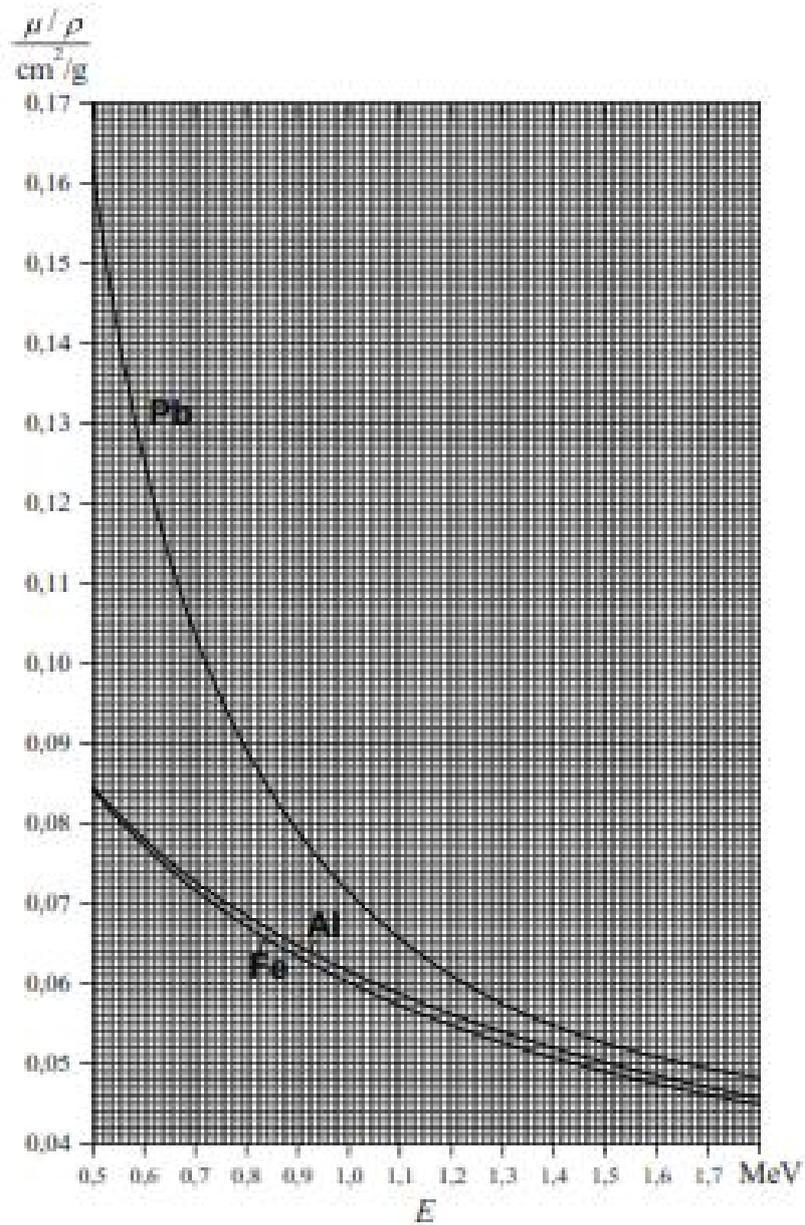


Fig. 4 Dependências do coeficiente de atenuação mássico para radiação gama em Pb, Al e Fe em função da energia do fóton.