



Laboratório de Física Moderna

2011

# INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

## Aula 1

Paulo R. Costa

*Instituto de Física da Universidade de São Paulo*



## O que vamos aprender?

- Aula 1
  - Processos de interação da radiação gama com a matéria
    - Fontes de radiação gama
    - Princípios de funcionamento de detectores cintiladores
      - Noções de espectroscopia
      - Calibração do detector
    - Processos de atenuação da radiação gama pela matéria
    - Utilização do aplicativo X-COM (NIST)
    - Utilização do software Origin 8.0
- Aulas 2 e 3
  - Efeito Compton
    - Instrumentação para detecção do efeito Compton
    - Determinação da massa de repouso do elétron
  - Aniquilação de pósitrons
    - Instrumentação para detecção de fótons em coincidência



## Atividades de hoje

- Identificar os componentes da instrumentação a ser utilizada
- Calibração de um espectro de radiação  $\gamma$
- Estudar a atenuação da radiação gama
  - em diferentes energias
    - 1 fotopico do  $^{137}\text{Cs}$  e 2 do  $^{60}\text{Co}$
  - através de diferentes materiais
    - Chumbo
    - Alumínio
  - Determinação do coeficiente de atenuação linear para o Pb e o Al nos fotopicos das fontes de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$
  - Determinar a camada semi-redutora para os materiais nas energias dos fotopicos



## Radiação gama e o decaimento radioativo



## Lei do decaimento radioativo

- A taxa de decaimento de um núcleo radioativo em uma amostra grande depende somente do número de núcleos radioativos dessa amostra que ainda não se desintegraram

$$\frac{dN}{dt} \propto -N \Rightarrow \frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$



## Desintegração ou Decaimento Radioativo

### Atividade de uma fonte

- quantos núcleos se desintegram por unidade de tempo

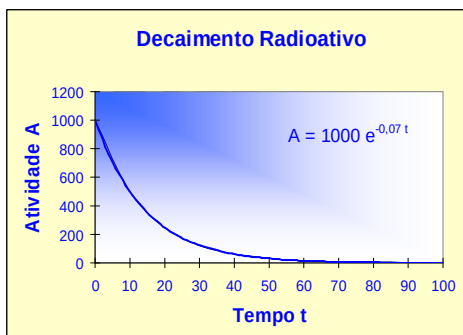
1 Becquerel = 1 desintegração por segundo

$$1 \text{ Curie (Ci)} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$



## Decaimento Radioativo

A atividade diminui exponencialmente com o passar do tempo:



$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

$A$  = Atividade no instante  $t$

$A_0$  = Atividade inicial

$\lambda$  = cte decaimento radioativo



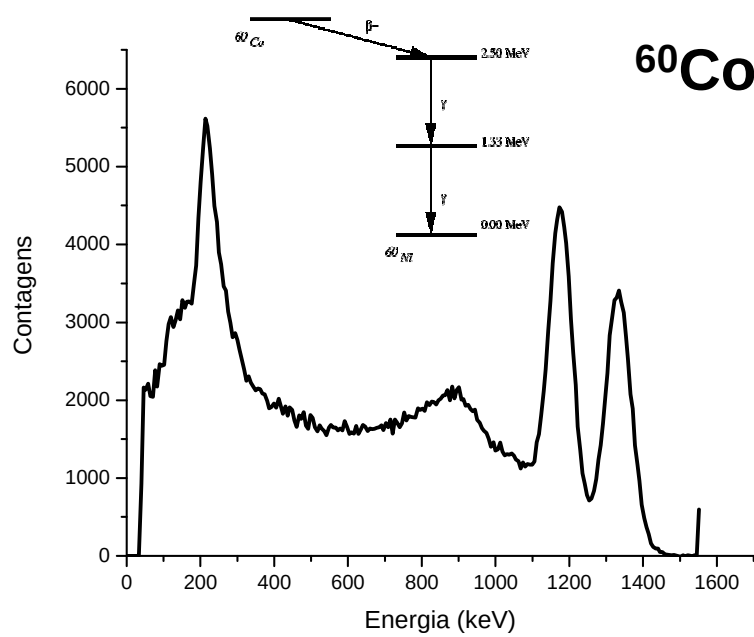
## Meia Vida - $T_{1/2}$

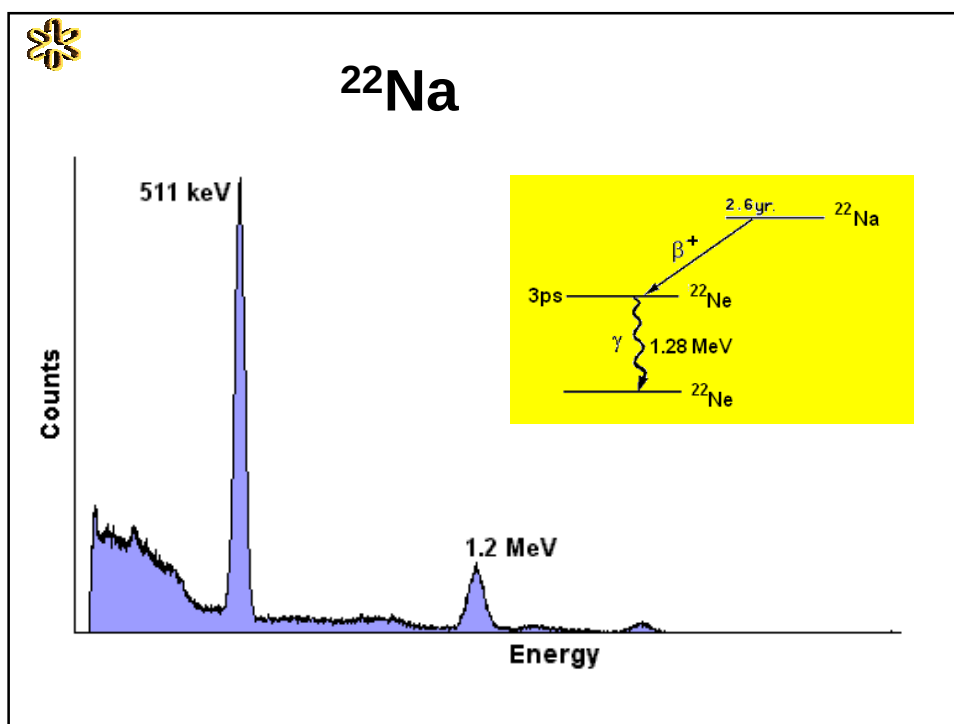
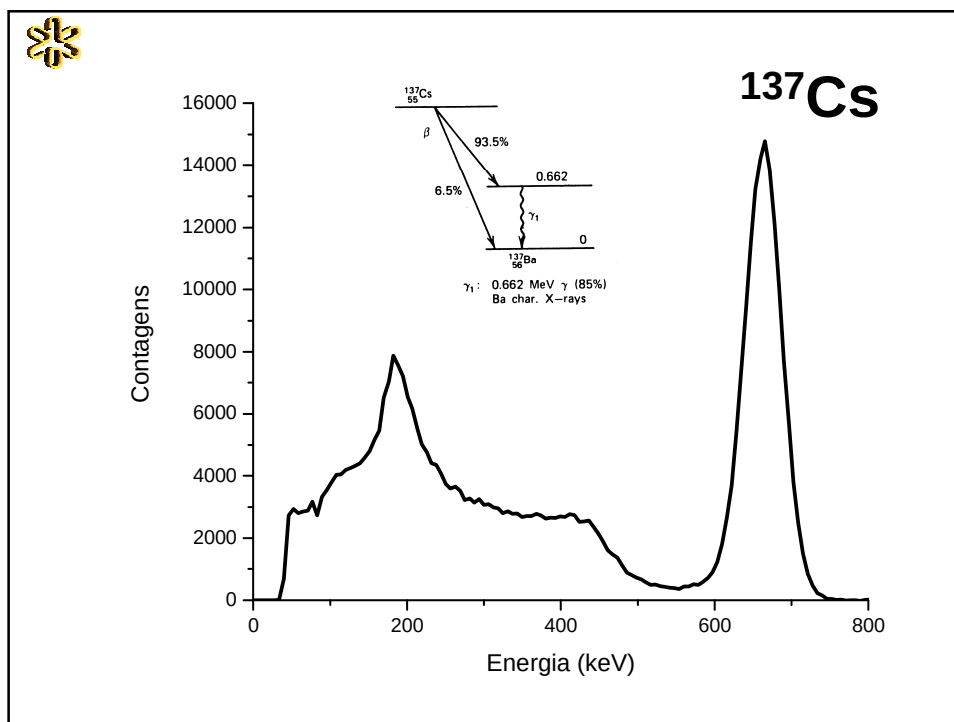
- Tempo necessário para que a atividade inicial seja reduzida à metade
- Característica física de cada isótopo radioativo.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$



## FONTES RADIOATIVAS UTILIZADAS NESTE CURSO







## Meia-vida - $T_{1/2}$

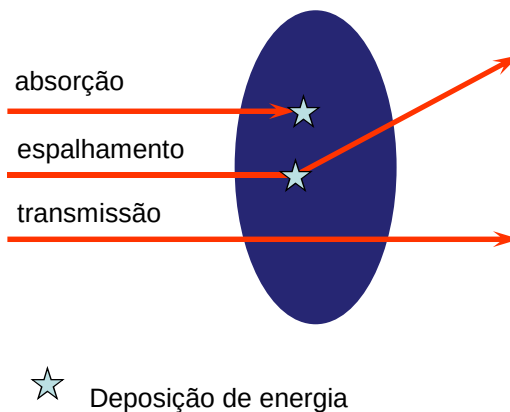
- **Césio-137**       $T_{1/2} = 30,07$  anos
- **Cobalto-60**       $T_{1/2} = 5,271$  anos
- **Sódio-22**       $T_{1/2} = 2,6$  anos
- Iodo-131       $T_{1/2} = 8$  horas
- Polônio-214       $T_{1/2} = 0,00016$  segundos
- Amerício-241       $T_{1/2} = 432$  anos



## Interações da radiação gama com a matéria

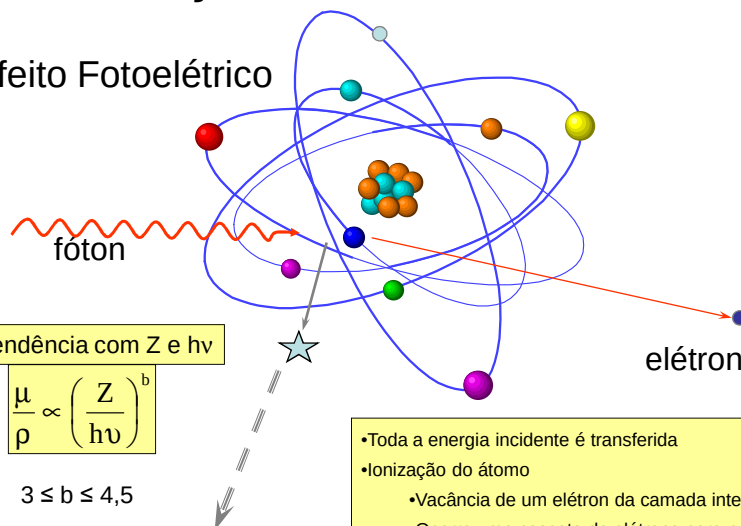


## Interação de fótons com a matéria



## Interação de fótons com a matéria

### Efeito Fotoelétrico



Dependência com Z e  $h\nu$

$$\frac{\mu}{\rho} \propto \left( \frac{Z}{h\nu} \right)^b$$

$$3 \leq b \leq 4,5$$

Radiação  
característica

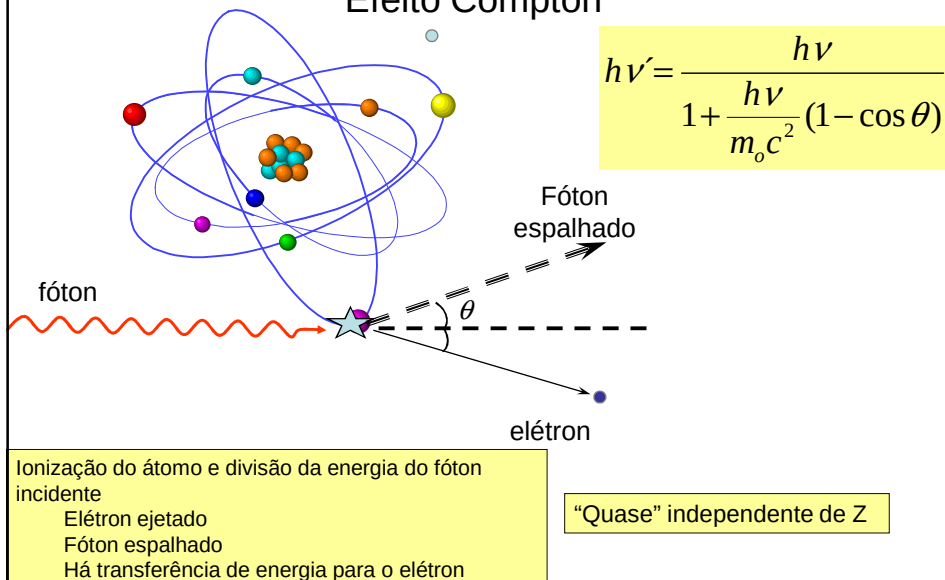
- Toda a energia incidente é transferida
- Ionização do átomo
  - Vacância de um elétron da camada interna
  - Ocorre uma cascata de elétrons para preencher a vacância e retornar ao equilíbrio
  - Emissão de raios X característicos





## Interação de fótons com a matéria

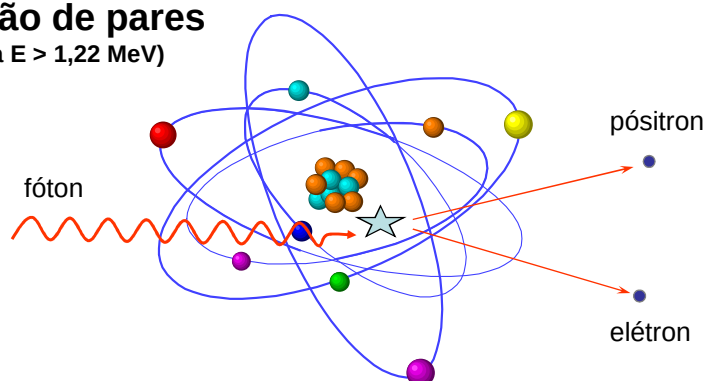
### Efeito Compton



## Interação de fótons com a matéria

### Produção de pares

(só para  $E > 1,22 \text{ MeV}$ )





## Interação de fótons com a matéria

- Para uma espessura arbitrária de material

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{I} = -\mu \Delta x$$



$$I = I_0 e^{-\mu(h\nu, Z)x}$$



Feixe estreito,  
monoenergético  
em meio  
uniforme

$$\mu(h\nu, Z)$$



Coeficiente de atenuação linear  
(probabilidade de interação do fóton por unidade de comprimento)

$$\frac{1}{\mu(h\nu, Z)}$$

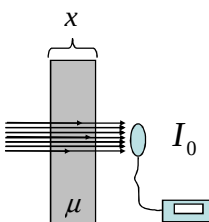


Caminho livre médio  
(distância média que o fóton atravessa antes de interagir)



## Coeficientes de interação

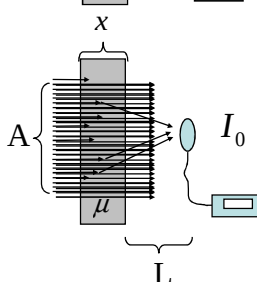
Feixe estreito  
(boa geometria)



$$I_e = I_0 e^{-\mu x}$$

$$I_l > I_e$$

Feixe largo  
(má geometria)



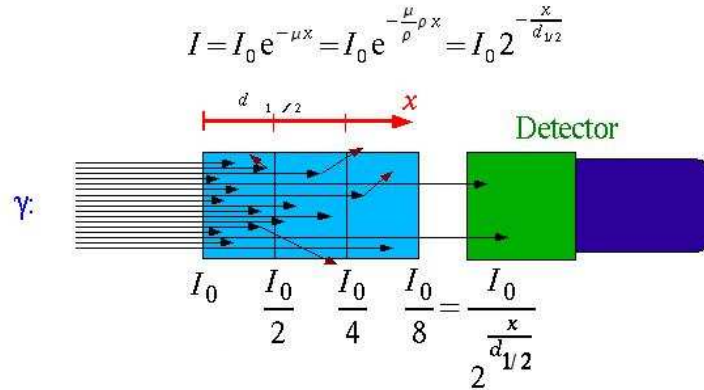
$$I_l = B I_0 e^{-\mu x}$$



$$f(x, h\nu, A, L)$$



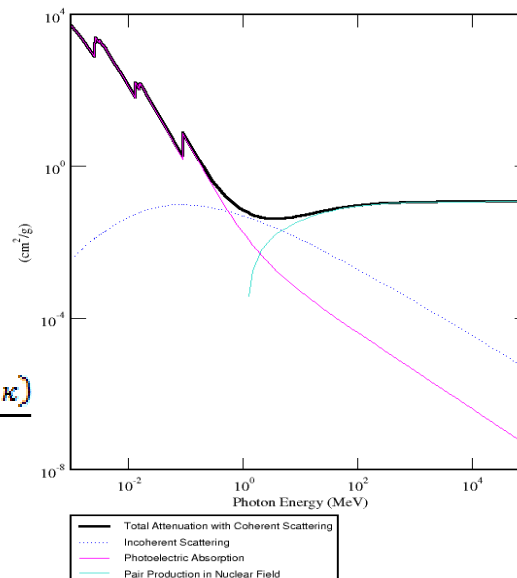
## Camada semi-redutora



$d_{1/2}$  é definido como a espessura semi-redutora  $\rightarrow d_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\mu(h\nu, Z)}$



Lead



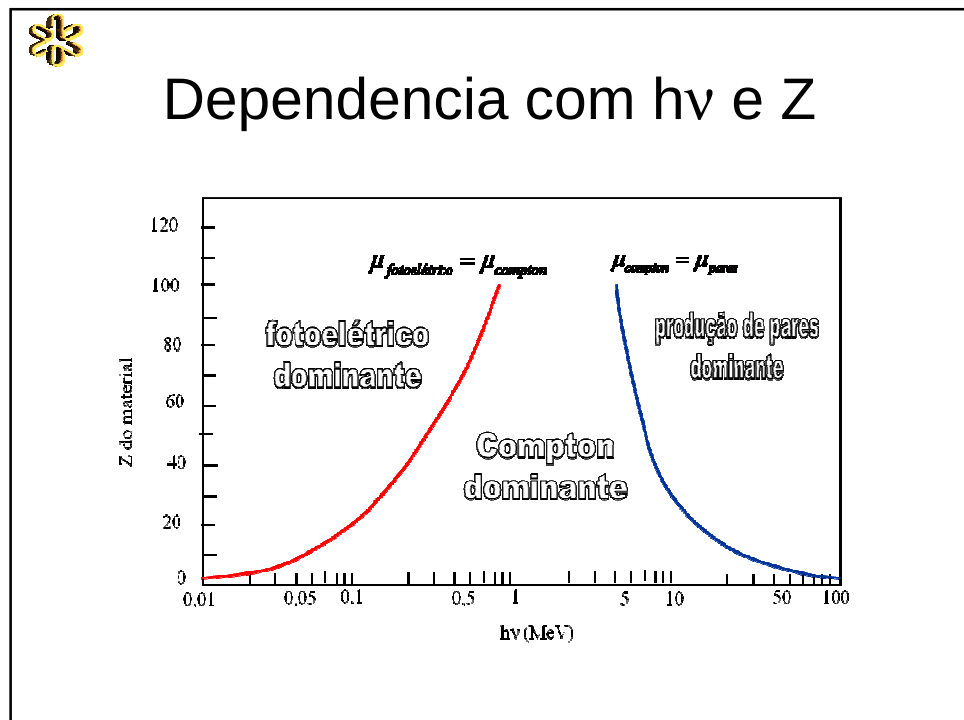
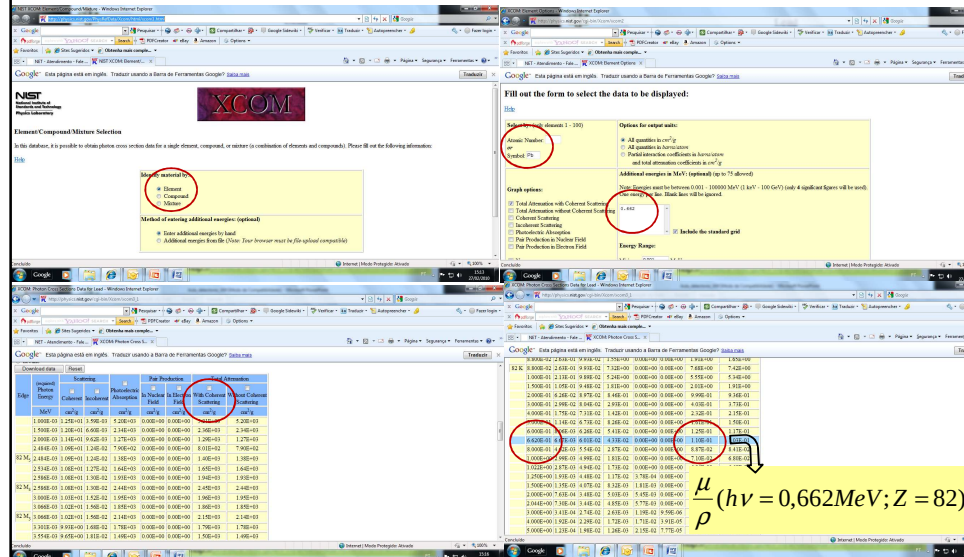
$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{(\tau + \sigma_R + \sigma_C + \kappa)}{\rho}$$

X-COM



<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

# X-COM



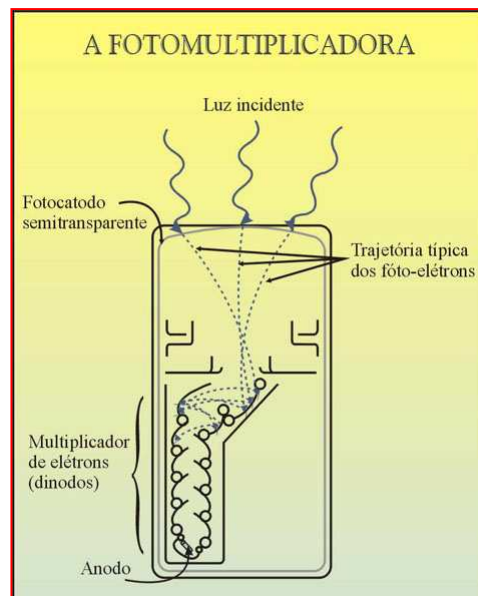


# CINTILADORES



## Detectores Cintiladores

- *Convertem a energia depositada em um pulso de luz, com grande eficiência.*
- *Intensidade de luz proporcional à energia depositada.*
- *Meio transparente para a luz produzida.*
- *Tempo de emissão curto.*
- *Fácil de produzir em grandes dimensões.*
- *Índice de refração próximo ao do vidro.*



Material do fotocato do deve apresentar baixa função de trabalho (1.5 a 2.0 eV)

(K-Cs, Na-K)

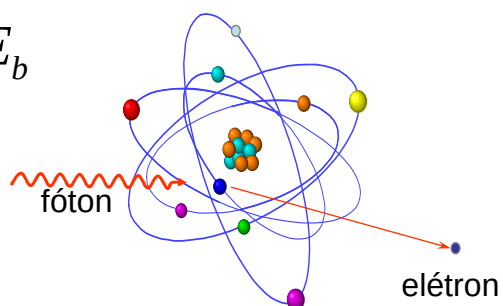
$\Delta V \sim 100V$  (por dinodo)



## Deposição total da energia do fóton: efeito fotoelétrico

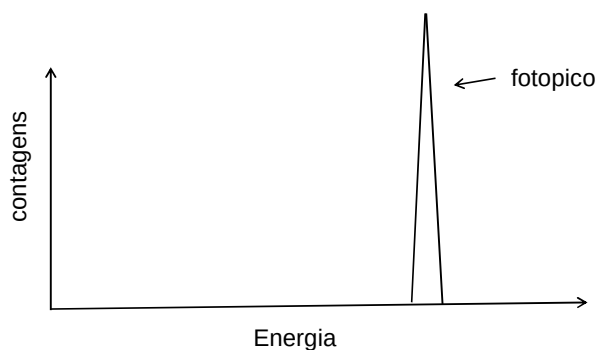
- Efeito Fotoelétrico
  - Deposição total de energia
  - Elétron colocado em movimento

$$E_{e^-} = h\nu - E_b$$



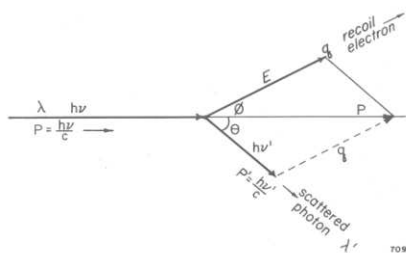
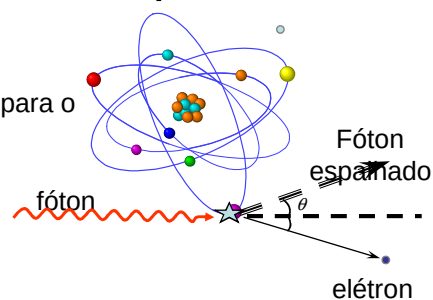


## Deposição total da energia do fóton: efeito fotoelétrico



## Deposição parcial de energia: Espalhamento Compton

- Compton
  - Transferência parcial de energia para o elétron
  - Fóton espalhado residual

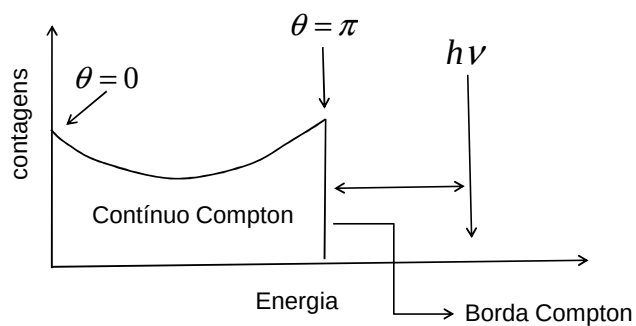


$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \left( \frac{h\nu}{m_0 c^2} \right) (1 - \cos \theta)}$$

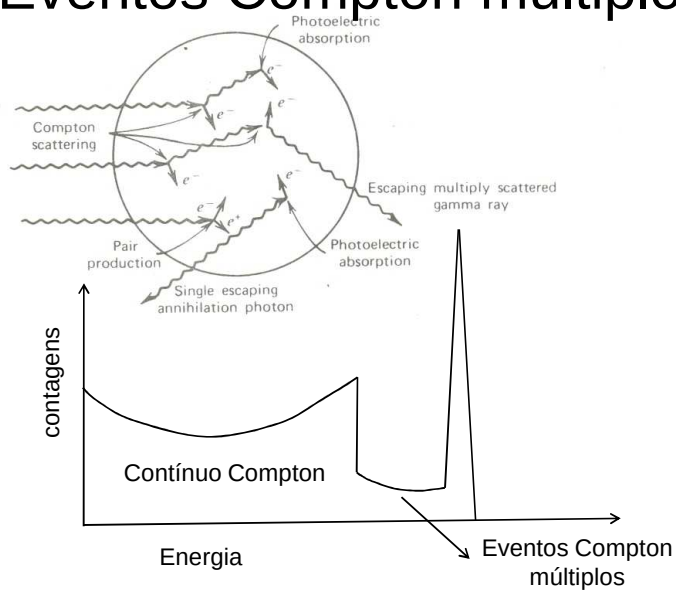
$$E_e = h\nu \left[ \frac{\left( \frac{h\nu}{m_0 c^2} \right) (1 - \cos \theta)}{1 + \left( \frac{h\nu}{m_0 c^2} \right) (1 - \cos \theta)} \right]$$



## Borda Compton



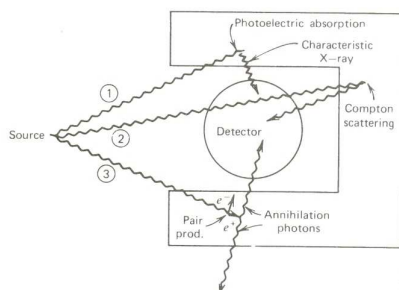
## Eventos Compton múltiplos



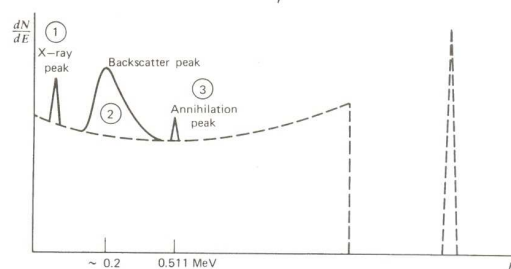




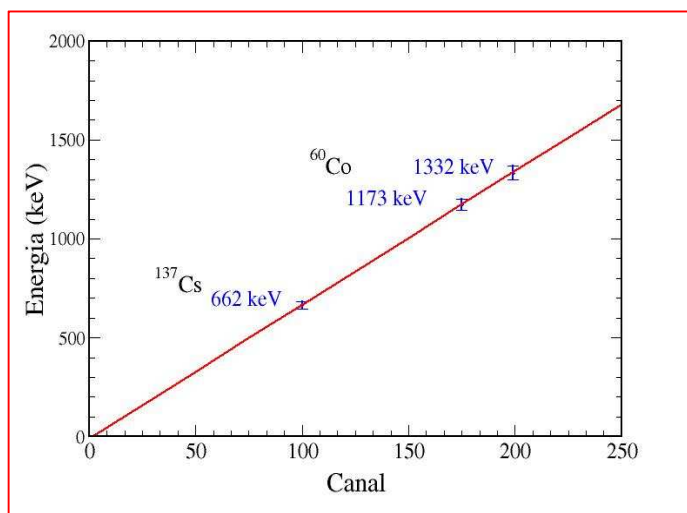
## Efeito dos materiais nas redondezas do detector



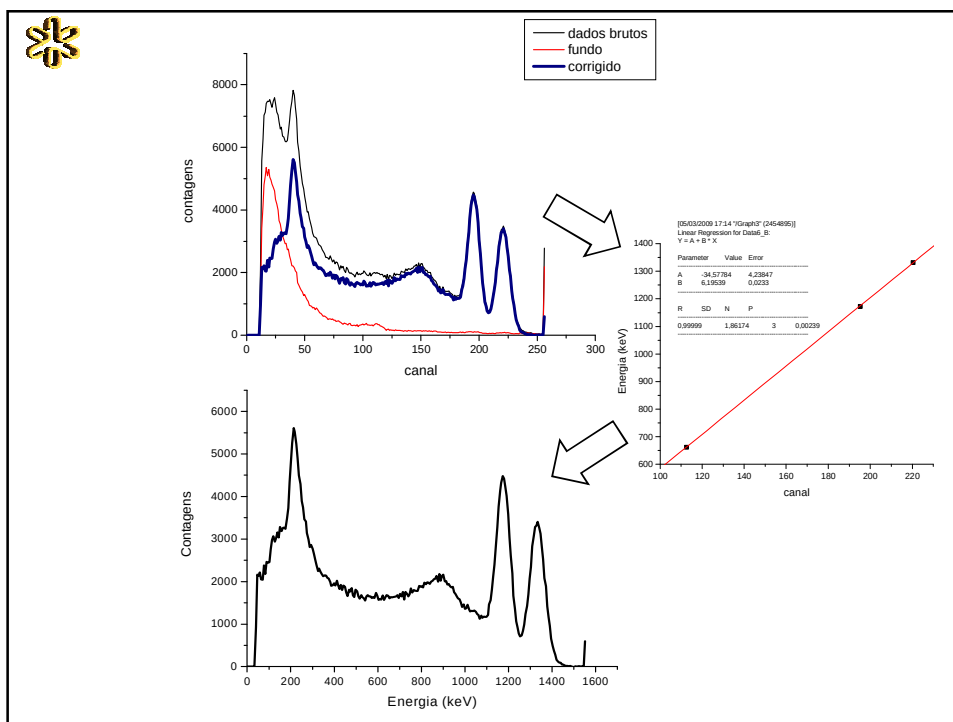
$$h\nu'_{\theta=\pi} \approx \frac{h\nu}{1 + 2\left(\frac{h\nu}{m_0c^2}\right)}$$



## Calibração de energia

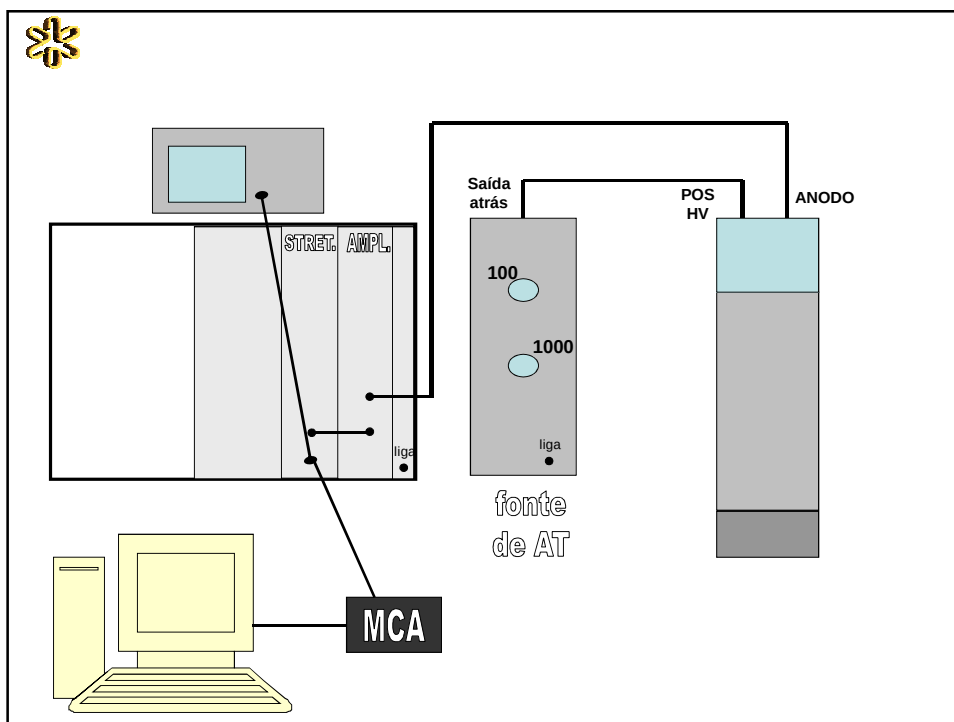


$$E(\text{keV}) = a + b C$$



## Segurança durante as medições

- Não variar as tensões nos equipamentos acima dos valores indicados
  - Elevar ou abaixar as tensões lentamente
- Cuidado com choques elétricos
- Cuidados na manipulação das fontes radioativas
  - São de atividade baixa e bastante seguras
  - A proximidade das fontes radioativas nos contadores dos outros grupos pode prejudicar a qualidade das medições
  - Radioproteção
    - Tempo
    - Distância
    - Blindagem



## Atividades de hoje

### • Calibração do Espectro

- Identificar todos os equipamentos: detector cintilador, fonte de tensão, amplificador, ADC, MCA, etc.
- Monte o circuito apropriado para a medida do espectro de raios gama das fontes radioativas.
- Aplicar uma tensão de cerca de 1100 V à fotomultiplicadora do detector de iodeto de sódio (NaI(Tl)).
- Abra o software Mc32 que será utilizado para a aquisição de dados.
- Coloque a fonte de  $^{60}\text{Co}$  na parte inferior do suporte, aproximadamente no centro.
- Configure para contar 100 segundos. Observe o espectro que vai aparecer na tela. Com auxílio do ganho fino e ganho grosso, configure a posição dos picos do cobalto, de modo a ficarem no final da tela ([FIGURA](#))
- Após o ajuste do ganho, faça uma medição completa. Salve o arquivo após o ajuste do ganho.
- Repita o mesmo procedimento para uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , sem mudar o ganho.
- Abra a planilha do Origin 8.0 para tratar os dados.
- Abra o workbook correspondente ao Co e importe os dados armazenados. Repita o procedimento para o Cs.
- Delete as duas primeiras linhas de cada espectro (isto será repetido para todos os espectros).
- Ajuste curvas gaussianas para cada um dos três picos (um do Cs e dois do Co). O professor e/ou monitor dará as instruções.
- Utilize o centróide (xc) do pico ajustado para fazer a reta de calibração. **NÃO SE ESQUEÇA DE CONSIDERAR AS INCERTEZAS.**
- **Observação:** Há um tutorial do Origin disponível na página do site, no STOA
  - <http://moodle.stoa.usp.br/course/view.php?id=1106>



## Experimento 1 – Determinação do coeficiente de atenuação

- Utilize o software MC32 para a aquisição de dados.
- Medir a radiação de fundo com o tempo de contagem de 50 segundos.
- Coloque uma fonte radioativa ( $^{137}\text{Cs}$  ou  $^{60}\text{Co}$ ) na parte inferior da caixa, no centro.
- Faça a medição do espectro e subtraia as contagens da radiação de fundo.
- Calcule o número de contagens do fotopico (área do fotopico) utilizando o ajuste gaussiano do Origin, selecionando o valor de  $y_0$  (offset) igual a 0. A área corresponde ao valor de A do ajuste e ao valor de  $I_0$  da planilha.
- Agora, usando Al ou Pb como material atenuador
  - meça com um paquímetro a espessura das placas a serem utilizadas. Faça, pelo menos, cinco medições e obtenha a média e o desvio padrão das medições.
  - meça as contagens dos fotopicos obtidos pelos espectros de transmissão.
  - faça medições até que o número de contagens do fotopico caia para cerca de 25% da primeira contagem ( $I_0$ ). **Sugestão:** faça pelo menos cinco pontos no gráfico, calculando suas respectivas incertezas.
  - Faça um gráfico de  $I/I_0$  versus espessura usada para atenuar o feixe. **NÃO SE ESQUEÇA DE CONSIDERAR AS INCERTEZAS.**
  - Identifique a correspondência entre o parâmetro de ajuste  $t_1$  da curva entre ( $I/I_0$  vs  $x$ ) e a grandeza física associada às propriedades de atenuação do material.
  - Compare o valor de  $m$ , obtido pelo ajuste, com o valor fornecido pelo aplicativo XCOM.
    - **Dados:**  $\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ g/cm}^3$  e  $\rho_{\text{Pb}} = 11,4 \text{ g/cm}^3$
- Repita os procedimentos anteriores para  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$  (picos de 1173 keV e 1332 keV) atenuados com Al e Pb.
- Obtenha a camada semi-redutora através do gráfico ajustado e calcule o coeficiente de atenuação linear utilizando a equação (20)



## Exercício

- Verifique o valor tabelado da atividade das fontes de  $^{60}\text{Co}$  e  $^{137}\text{Cs}$  e determine a atividade atual das fontes
  - **Dados:** Atividade das fontes = 7,4MBq em 29/04/1999
  - Meia vida = 30,07 anos ( $^{137}\text{Cs}$ ) e 5,27 anos ( $^{60}\text{Co}$ )
- Discuta as possíveis razões para as diferenças encontradas nos valores de  $\mu$  obtidos pelos dois métodos aplicados e o valor obtido pelo XCOM
- Usando o aplicativo X-COM, calcule as probabilidades relativas de ocorrência dos efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares no Al e no Pb para as três energias de fotopico utilizadas neste experimento

$\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ g/cm}^3$        $\rho_{\text{Pb}} = 11,4 \text{ g/cm}^3$



**PAULO R. COSTA**  
**DFN – IFUSP**  
pcosta@if.usp.br

Vários slides foram preparados pelos professores da disciplina Laboratório de Física Moderna (FNC377): Prof. José Roberto B. de Oliveira, Valdir Guimarães e Nilberto Medina