

# Laboratório de Física Experimental Avançada I

... Estatística

Detectores

# Gaussiana

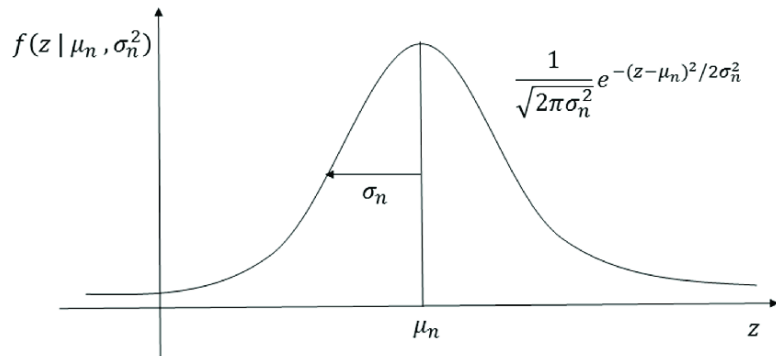
- Para médias altas existe outra distribuição limite: a gaussiana:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

- Média:  $\mu$
- Desvio Padrão:  $\sigma$

Flutuação no valor médio:

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$



Nota: Não temos acesso à distribuição. Apenas a conjunto de eventos representativos da distribuição

# Resultados

- Adoptamos como resultado o valor médio  $\pm$  incerteza estatística:

$$\mu \pm \sigma$$

- E quando queremos **derivar outras quantidades**? Por exemplo uma função  $x \rightarrow f(x)$

- $f(x + \delta x) \sim f(x) + f'(x) \cdot \delta x$

- $\delta f(x) = f(x + \delta x) - f(x)$

$$\delta f(x) \sim f'(x) \cdot \delta x$$

Impacto no resultado

Incerteza na variável

- Somando em quadratura outras variáveis:

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots)$$

$$\delta f(x_1, x_2, x_3, \dots) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \delta x_i \right)^2}$$

## Dois casos práticos

$$f = x + y \rightarrow \sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$$

$$f = x \cdot y \rightarrow \sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2$$

$$= y^2 \sigma_x^2 + x^2 \sigma_y^2$$

$$= x^2 y^2 \frac{\sigma_x^2}{x^2} + x^2 y^2 \frac{\sigma_y^2}{y^2}$$

$$= f^2 \left( \frac{\sigma_x^2}{x^2} + \frac{\sigma_y^2}{y^2} \right) \Rightarrow \frac{\sigma_f^2}{f^2} = \frac{\sigma_x^2}{x^2} + \frac{\sigma_y^2}{y^2}$$

## exemplos

$$\varepsilon^2(x+y) = \varepsilon^2(x) + \varepsilon^2(y)$$

$$\varepsilon_R^2(x \cdot y) = \varepsilon_R^2(x) + \varepsilon_R^2(y)$$

Manten um olho nos valores absolutos e relativos e perceber de onde vêm e para onde vão

Eg: 1mm em 10cm?  $\varepsilon_a = 1\%$

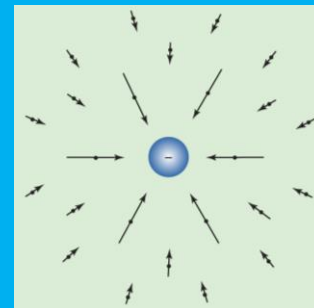
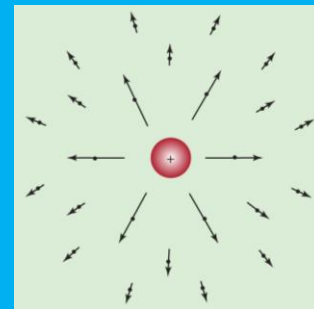
$$\varepsilon_f^2 = 3\%^2 + 0,1\%^2 + 0,009\%^2 + 20\%^2$$

# Laboratório de Física Experimental Avançada I

Detetores

# Detecção

## Partículas carregadas



# Partículas carregadas

- Interação por colisão e podem ionizar (gas, sólidos)
  - Mais tarde iremos ao detalhe da interacção carregados c/ matéria
- Alta probabilidade de interacção → alta secção eficaz
- N.º ionizações pode ser proporcional à sua energia
- Seguem-se alguns exemplos de deteção

As partículas carregadas excitam e/ou ionizam directamente os átomos

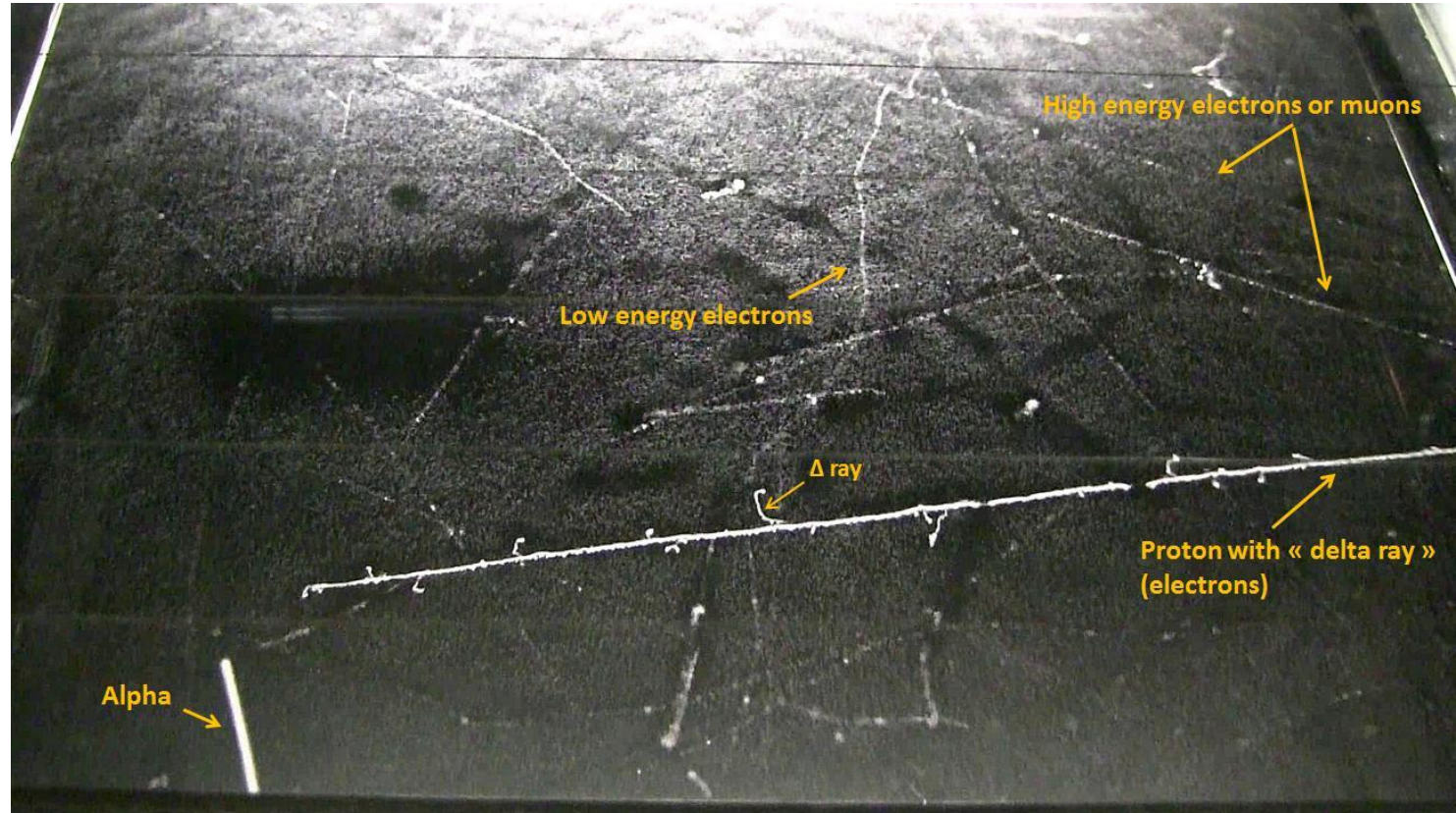


# Cloud/bubble chamber

Deposited energy  $\rightarrow$  change of state (bubbles of droplets)

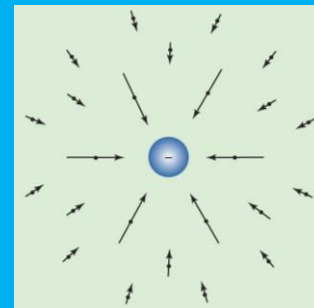
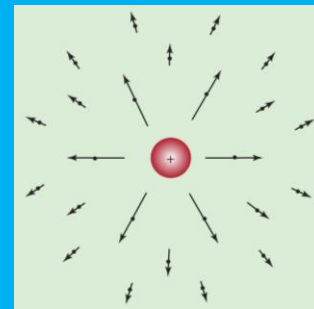
Number of bubbles  $\rightarrow$  energy deposited

Position of bubbles  $\rightarrow$



# Detecção Partículas carregadas

Detectores gasosos de ionização

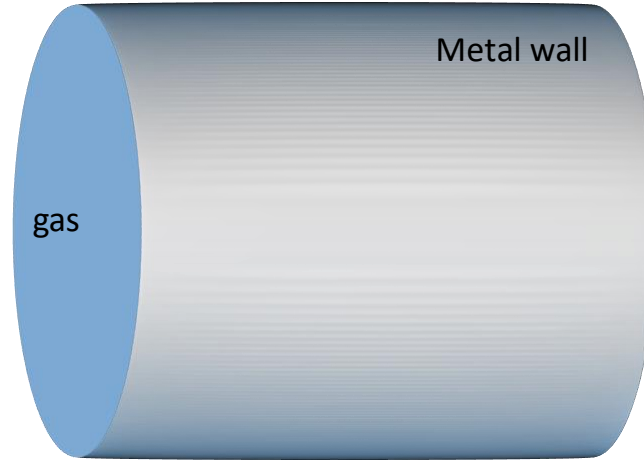


# Detectores de Ionização

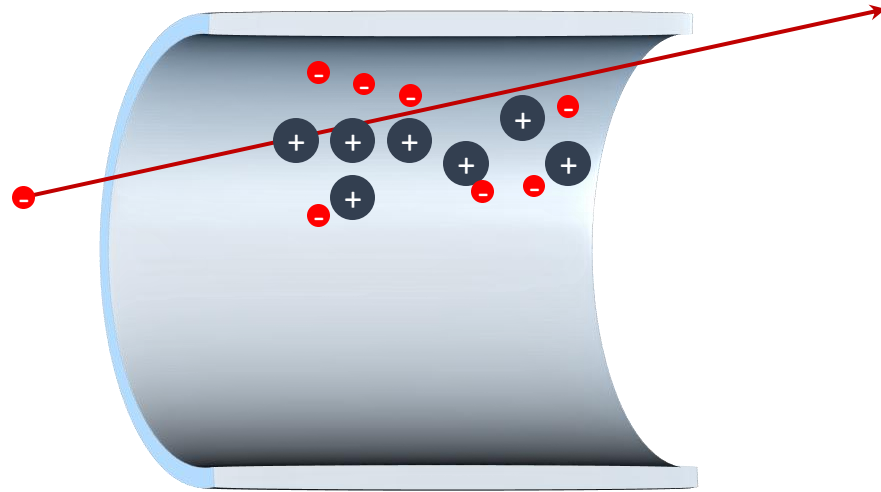
- A partícula deposita energia por ionização:
  - Pares carga negativa-positiva (electrão-ião ou electrão-buraco)
  - Transporte?
  - Amplificação?
  - Recolha?
- Várias variações possíveis. Vamos olhar para um volume cilíndrico de gás – contador de geiger



# Detector Geiger – princípio de funcionamento



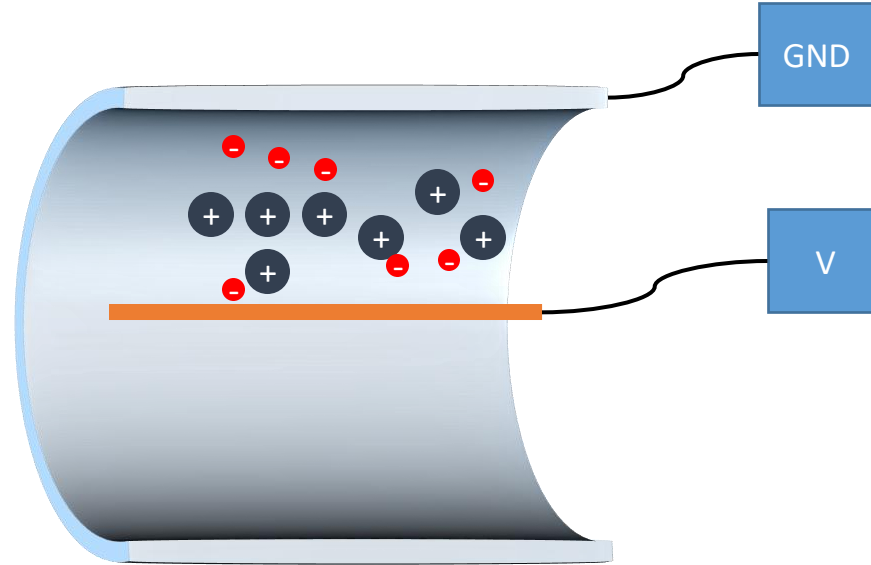
# Detector Geiger – princípio de funcionamento



Recombination


# Detector Geiger – princípio de funcionamento


- Cátodo: cilindro de paredes condutoras cheio de um gás nobre
- Ânodo: fio condutor ao longo do eixo do cilindro (+V<sub>0</sub>)
- Campo eléctrico: radial  
$$E(r) = \frac{1}{r} V_0 \ln r_{ext}/r_{int}$$



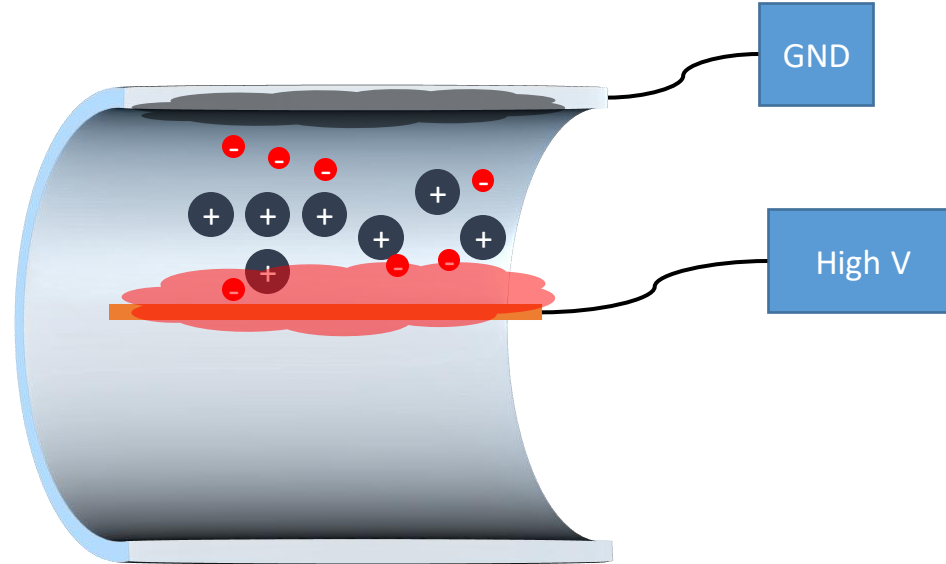
collection

# Detector Geiger – princípio de funcionamento

 Primary ionization

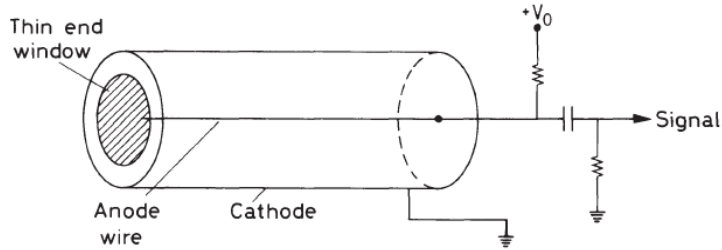
 Secondary ionization

 Tertiary ionization



multiplication

# O dispositivo



Campo eléctrico radial  
Muito forte perto do fio central

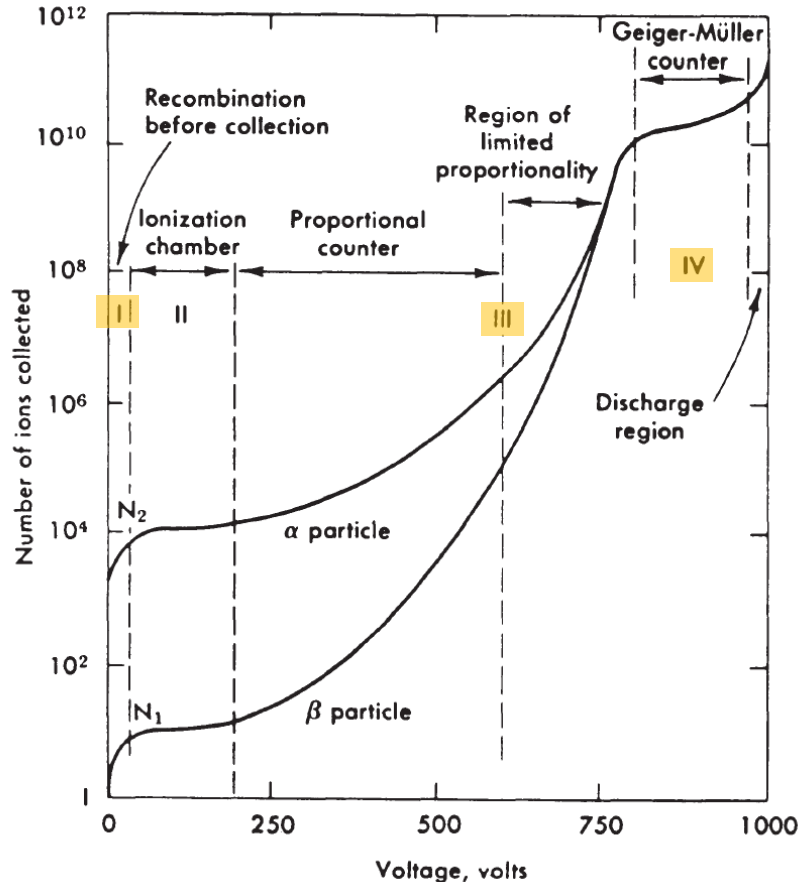
$$E = \frac{1}{r} \frac{V_0}{\ln(b/a)}$$

r: raio  
b: raio do interno cilindro  
a: raio do fio

Quando atravessado por partículas é depositada uma certa energia e são criados pares ião-electrão (em média 1 por cada 30 eV)



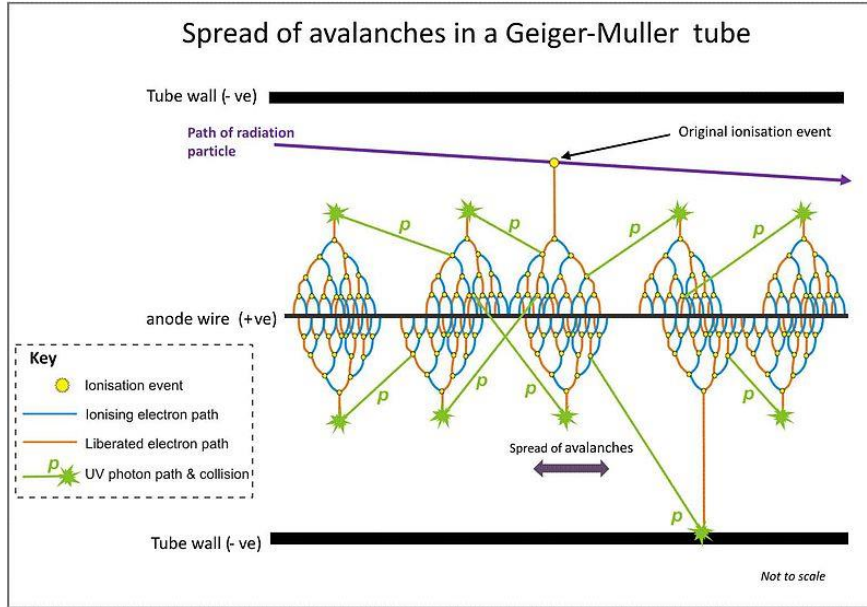
# Regimes de funcionamento



Vários tipos de detector no mesmo Hardware, dependendo da tensão

- **Região I** – se  $V_0 \sim 0$ , os pares e – ião recombina-se.  
**Não há carga recolhida.**
- **Região II – Câmara de ionização**  
A partir de certo valor de  $V_0$  todos os pares são recolhidos, sem multiplicação, e um aumento de  $V_0$  não tem efeito: **primeiro patamar.**
- **Região III – Contador proporcional**  
Continuando a aumentar  $V_0$ , os electrões libertados têm energia suficiente para produzir **ionizações secundárias** e estes ganham E...  
→ **Ionização em avalanche** (junto ao ânodo)  
→ ampliações  $10^4$  a  $10^6$   
→ Mais tensão maior multiplicação  
→ Space charge Effect limita crescimento avalanche (prop. limitada)
- **Região IV – Contador Geiger-Müller**  
Aumentando  $V_0$  ocorre uma **descarga no gás**:  
avalanches provocadas por fotões de desexcitação moleculares. O sinal em corrente satura - **patamar**
- **Região descarga**  
O detector está permanentemente em descarga

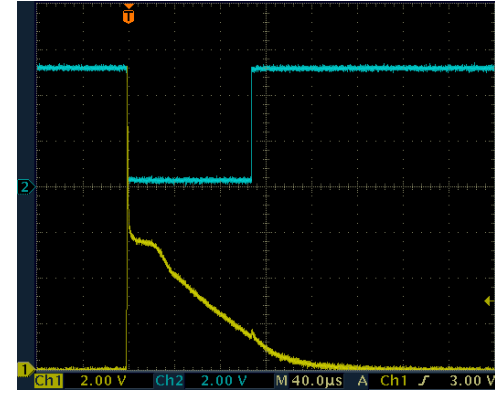
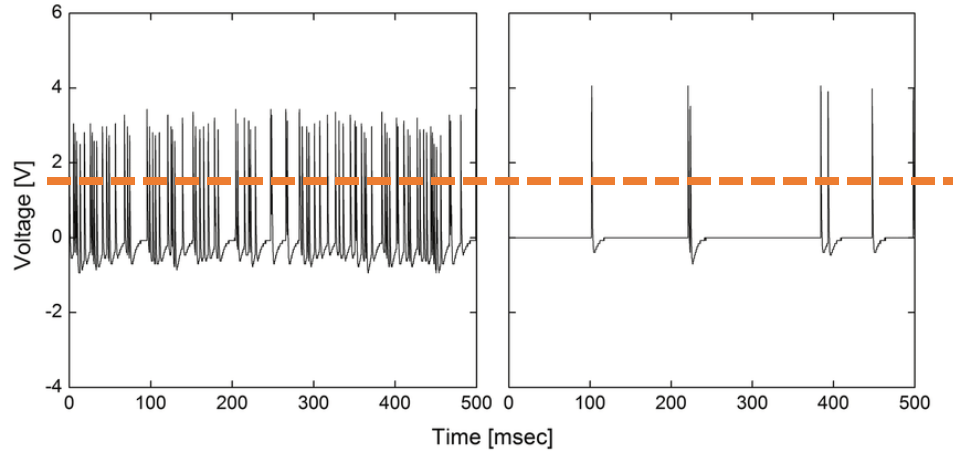
# Regime Geiger



- Neste modo existem ionizações “em todo o gás”
- Corrente está limitada pelo detector (depende da carga armazenada (condensador) e da reposição de carga (correntes) para manter tensão
- É necessário quenching: algo que mate a avalanche e permita recuperar
- Não há medida da energia – funciona em descarga, todos os sinais são de igual amplitude, independentemente da energia depositada (nº de pares  $e^-$ -ião inicial);
- Basta “1” ionização
- Tempo de recuperação relativamente alto -- “dead-time”;
- Apenas permite medir taxas de contagem da ordem de  $10^2$  Hz;
- Sistema simples
- Sinais generosos
- Não precisa amplificação electrónica

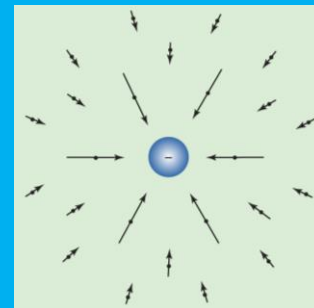
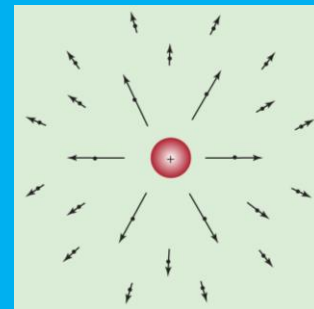
# Contagens com Geiger

Se o Geiger não tem resolução em E, então a amplitude dos pulsos pode ser ignorada e transformados em digital com um limiar

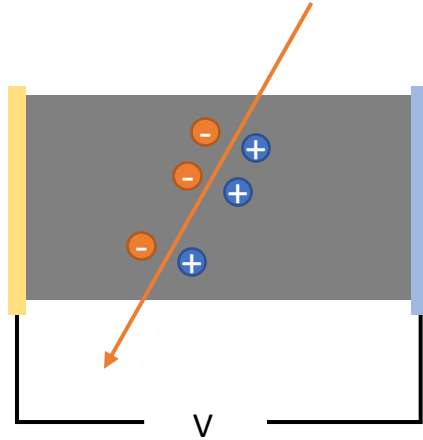


# Detecção Partículas carregadas

Detectores semicondutores

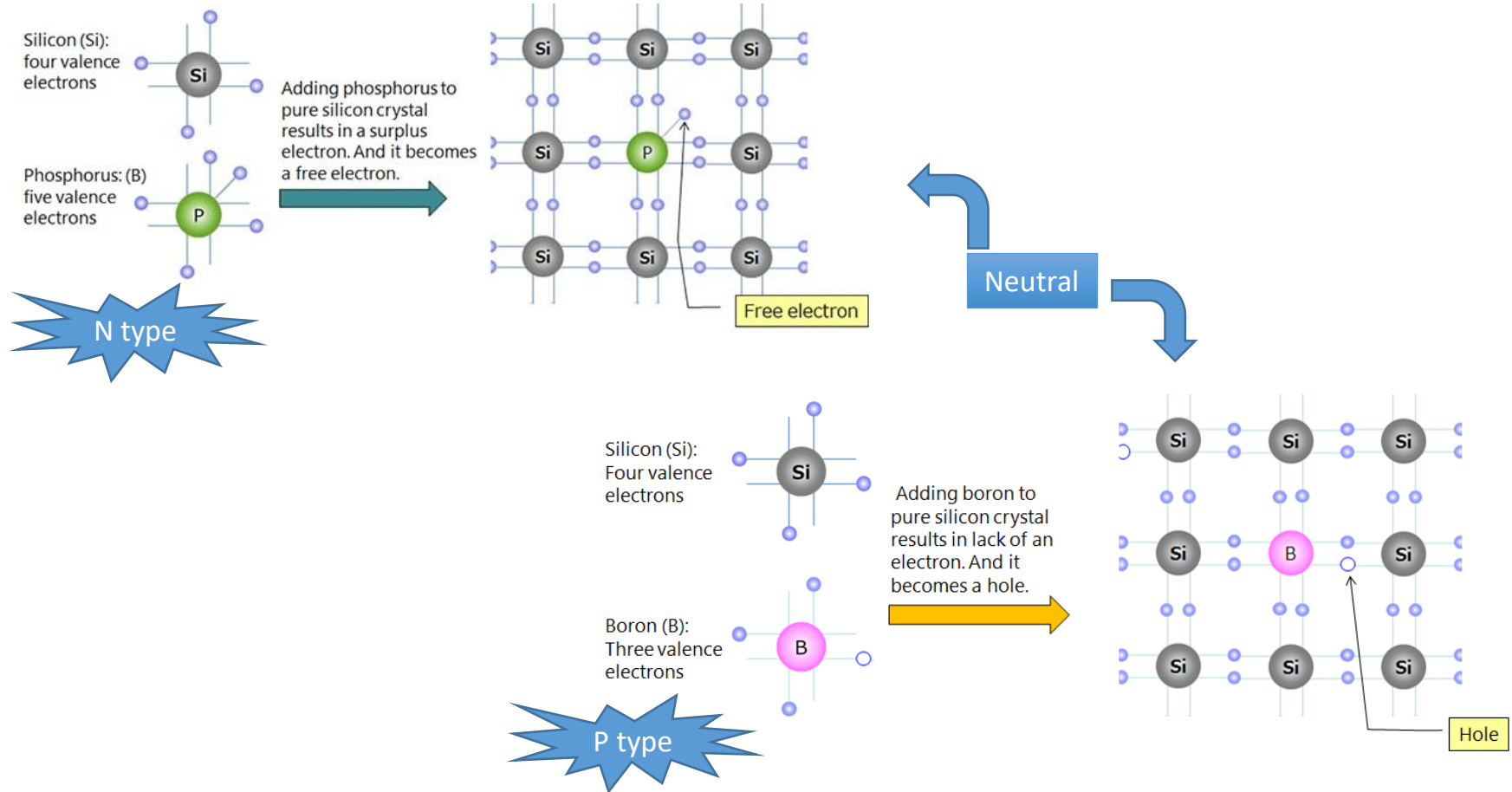


# Detectores Semicondutores

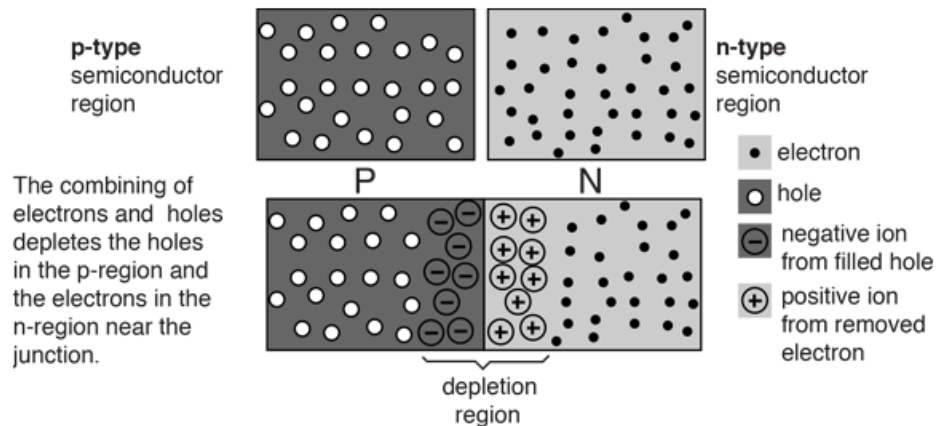


- Ionização do volume sensível
- Energia depositada → número de pares
- Colectar os pares: Sinal
- O Número de portadores livres tem que ser muito baixo: pode funcionar se arrefecido

# Detectores Semicondutores



# Detectores Semicondutores



Os portadores são varridos da zona de depleção:  
Um par e-H é varrido para os lados

Radiação ioniza e cria pares: ~1 par por cada 3.6 eV depositados.

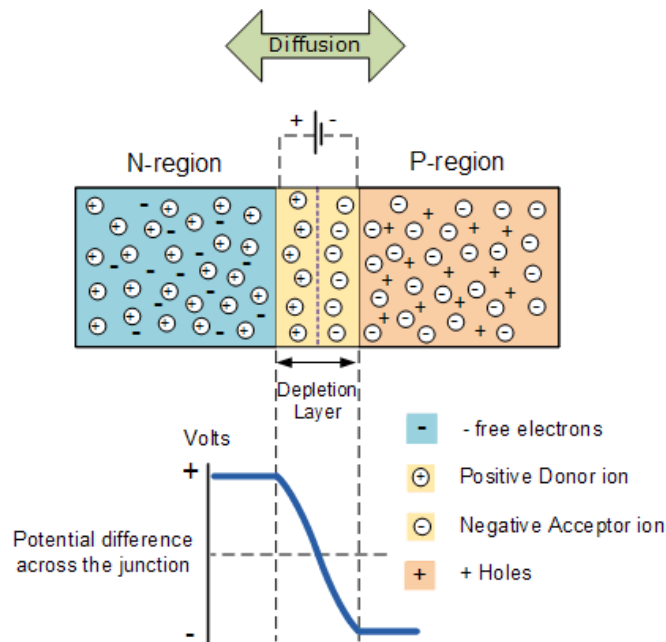
Se na zona de depleção → varridos e recolhidos

Por difusão os “extras” vão para o outro lado:

Tipo P: excesso de electrões → - - - - -

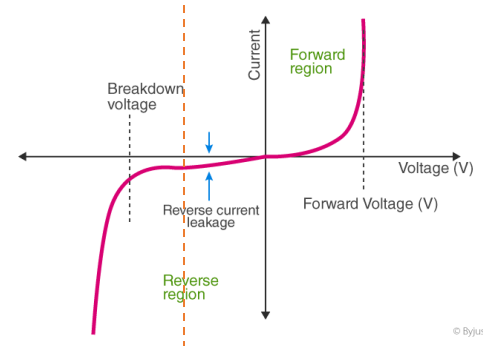
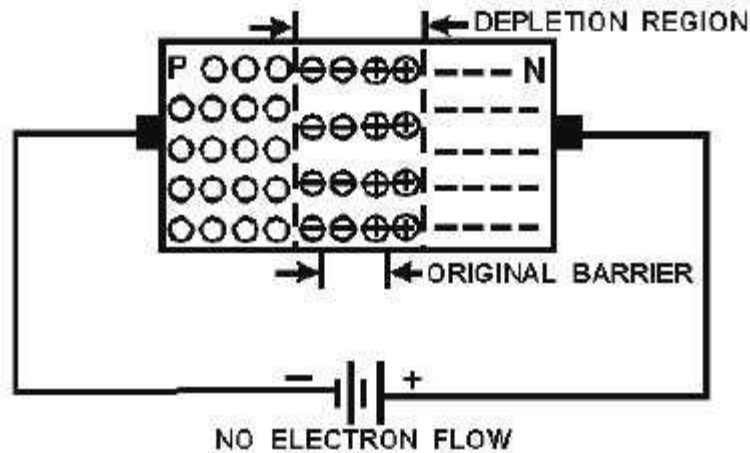
Tipo N: excesso de buracos → + + + + +

Desenvolve-se uma diferença de potencial de contacto que não permite a passagem de mais portadores



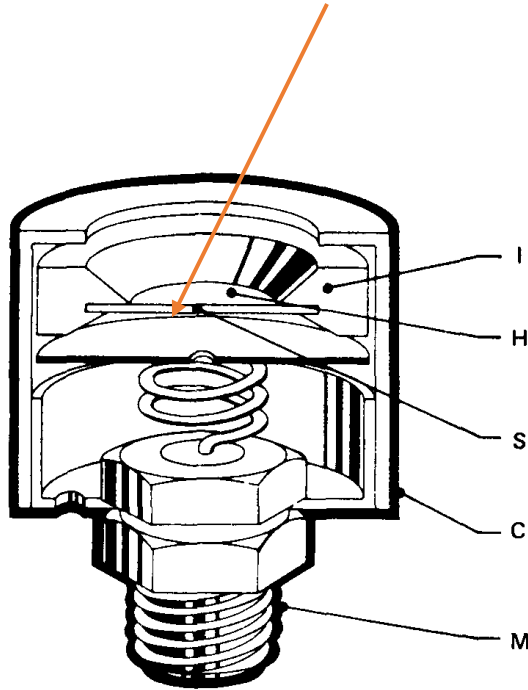
# Detectores semicondutores

- Potencial de contacto típico ~alguns volt
- Reverse Biasing: aplicação de uma tensão para aumentar a zona de depleção
- Detector mais eficiente (zona activa aumenta)
- A dada altura dá-se a disrupção do detector!
- Tipicamente tensões de biasing entre 10 e 1000V (típico <100V)
- Zonas de depleção passam das dezenas para as centenas (~10x)

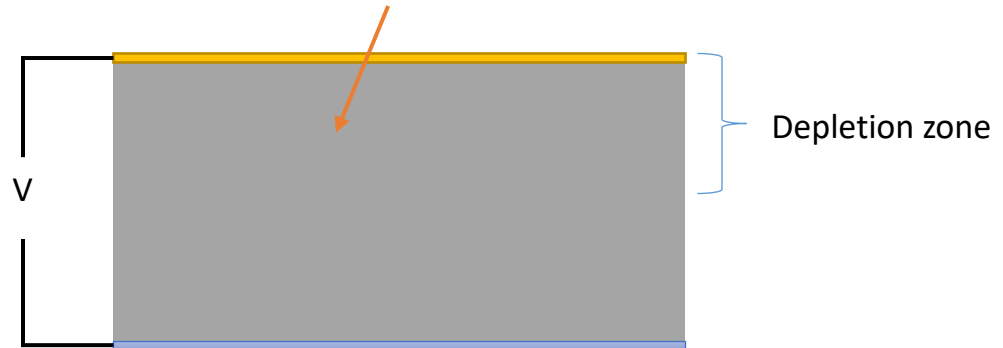




# Detectores semicondutores

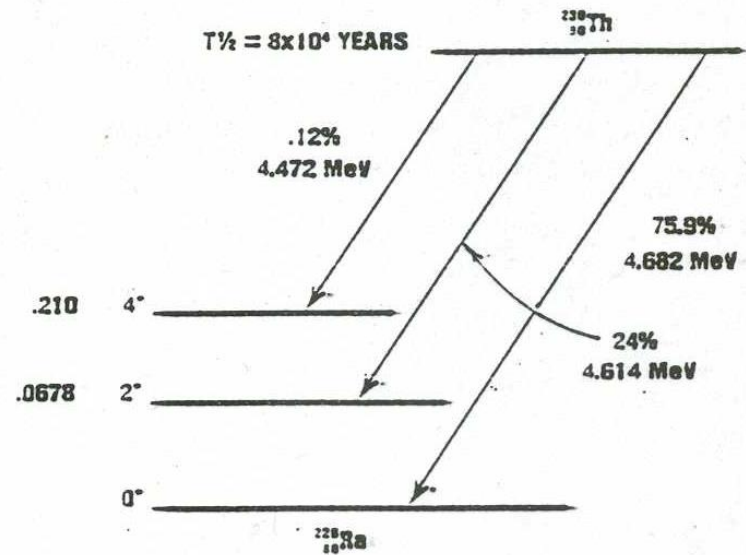
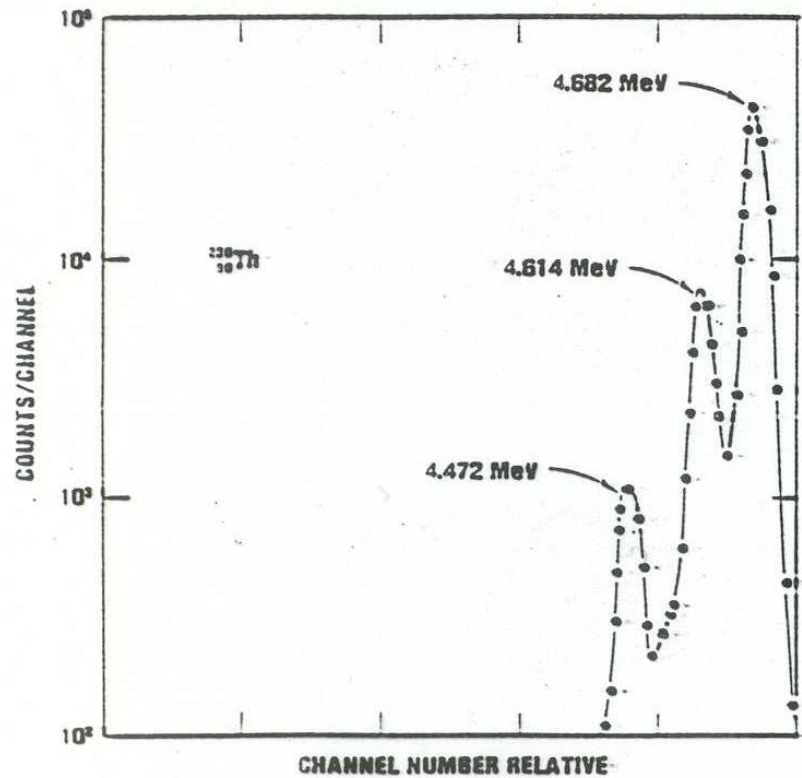


- Detectores de barreira de superfície
- Técnica especial que permite ter uma janela de entrada com perturbação mínima à entrada da radiação.
- Substrato N
- “electron traps” at surface junction with gold
- Layer de Ouro muito fina
- Tão fina que é opticamente transparente!



# Detectores semicondutores

- Muitos pares criados: não é efectuada amplificação no volume sensível
- Sinal electrónico “curto”: precisa amplificação
- e-H pares não recombinaem
- Numero de pares em média proporcional à energia depositada
- Denso: se suficientemente espesso: toda a energia é deixada no detector
- Assim, Sinal no detector  $\Leftrightarrow$  Energia da partícula
  - $\rightarrow$  Espectroscopia alfa?
  - $\rightarrow$  Espectroscopia beta?
  - $\rightarrow$  Espectroscopia muões?
  - $\rightarrow$  Contagens?
  - $\rightarrow$  Espectroscopia gama?



Boa resolução!

# Gama

Detector de cintilação

# Scintillators

Particle interaction → material excitation → return to ground state

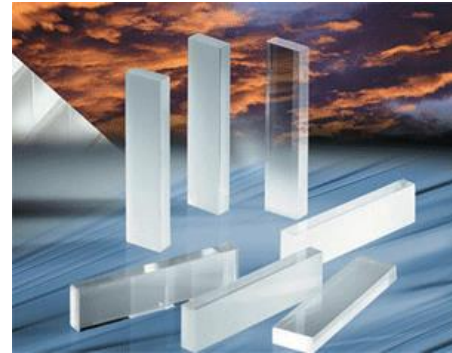
Emission of LIGHT (typical UV / Blue / Green) mainly by fluorescence

Fast Light production: Fluorescence

Delayed light production: Phosforecence

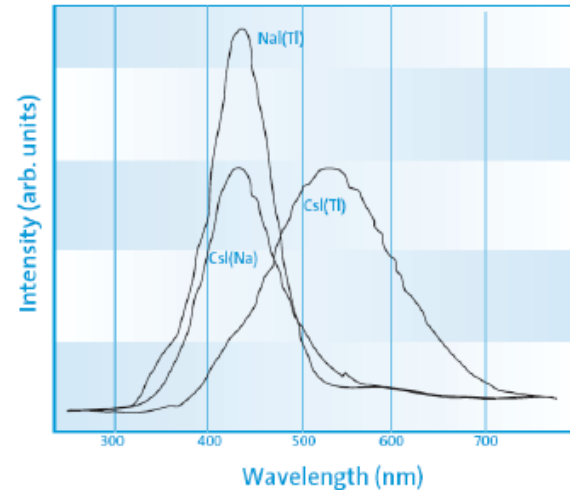
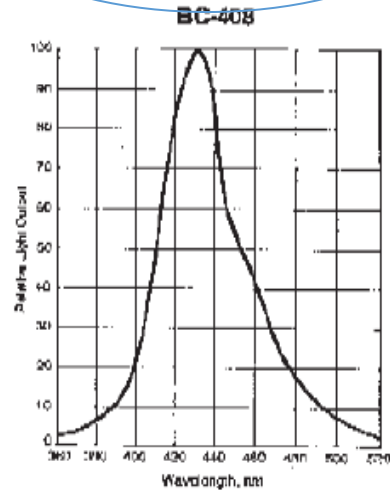
## Parameters:

- Light production
  - Efficiency : Light Yeld  
How many photons per energy deposited
  - Time of emission and time spread  
fast: allow high counting rates; allow time tagging
  - Spectra of emission  
How many photons at which wavelength
- Light transmission
  - transparency / mean free path

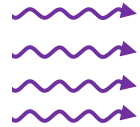
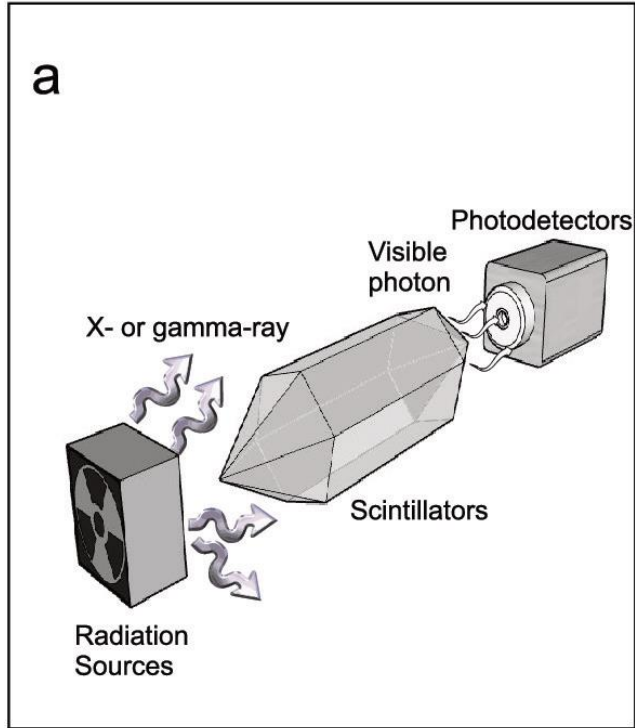


# scintillators

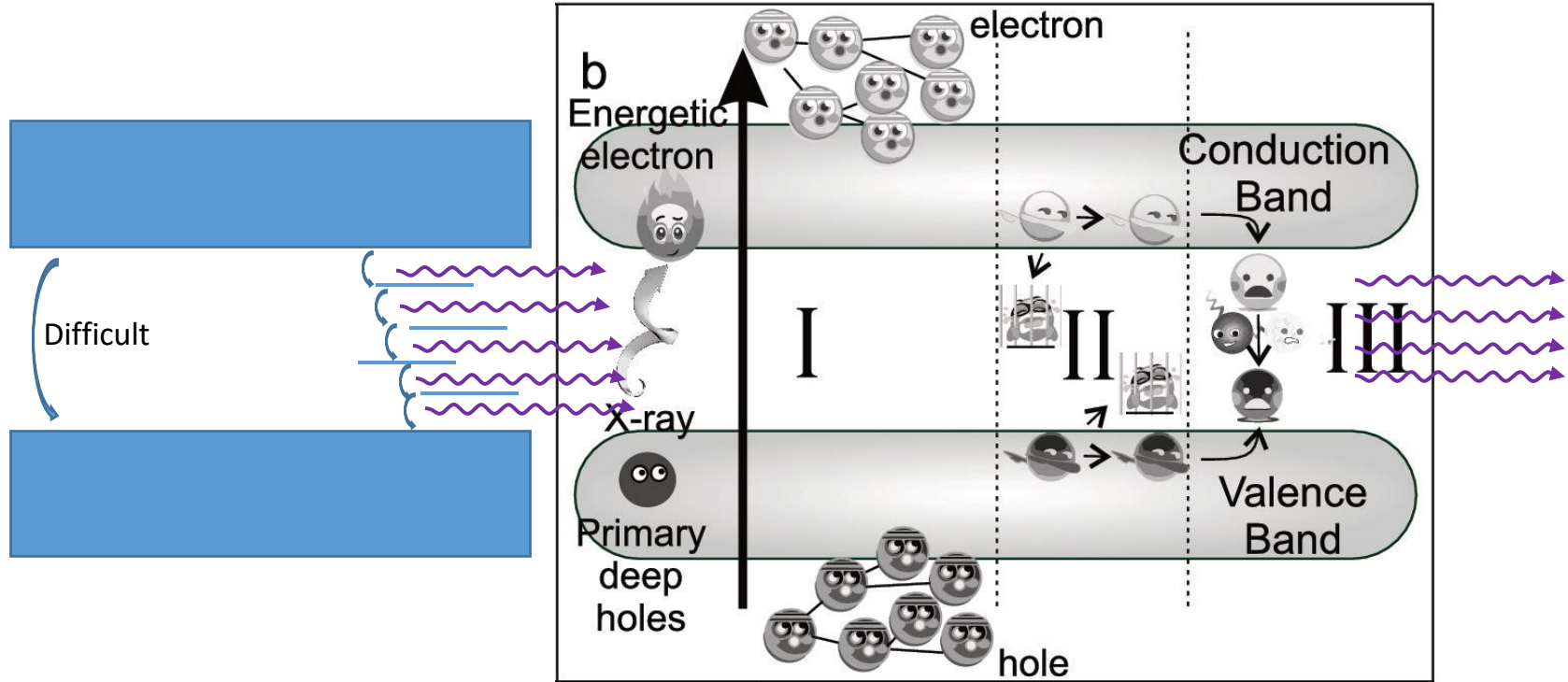
Material	eV/fotão	Tempo (nsec)	$\lambda_{max}$ (nm)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\frac{dE}{dx}$ (mip) (MeV/cm)	n
Anthracene	60 (100%)	30	447	1.25		1.62
Plástico NE104	88 (68%)	1.9	406	1.032		1.58
Nal	26 (230%)	230	413	3.67	4.8	1.85
BGO	173	300	480	7.13	9.2	2.20



# Whats happening



# Whats happening

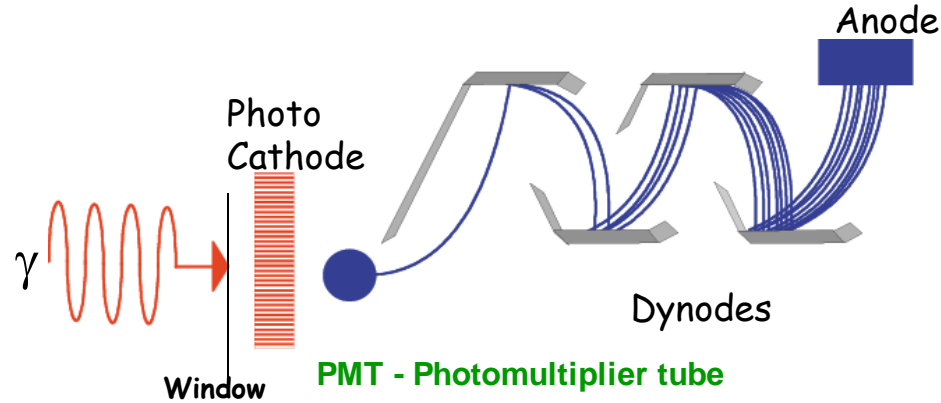




# Detecção de luz

Fotomultiplicador

# photomultipliers



Anode: collect the charge

Photoelectric:  $1 \gamma \rightarrow 0.2 e^-$   
(20 % quantum efficiency)

Multiplication:

HV: accelerate electron

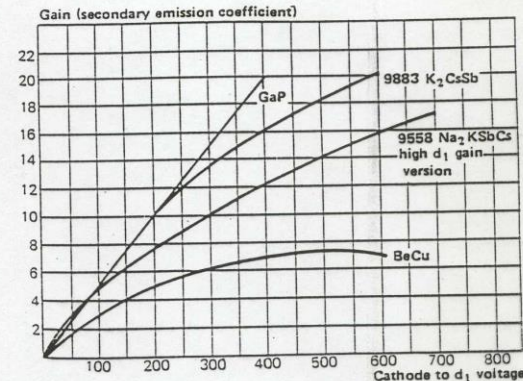
~900 V

10 dynodes

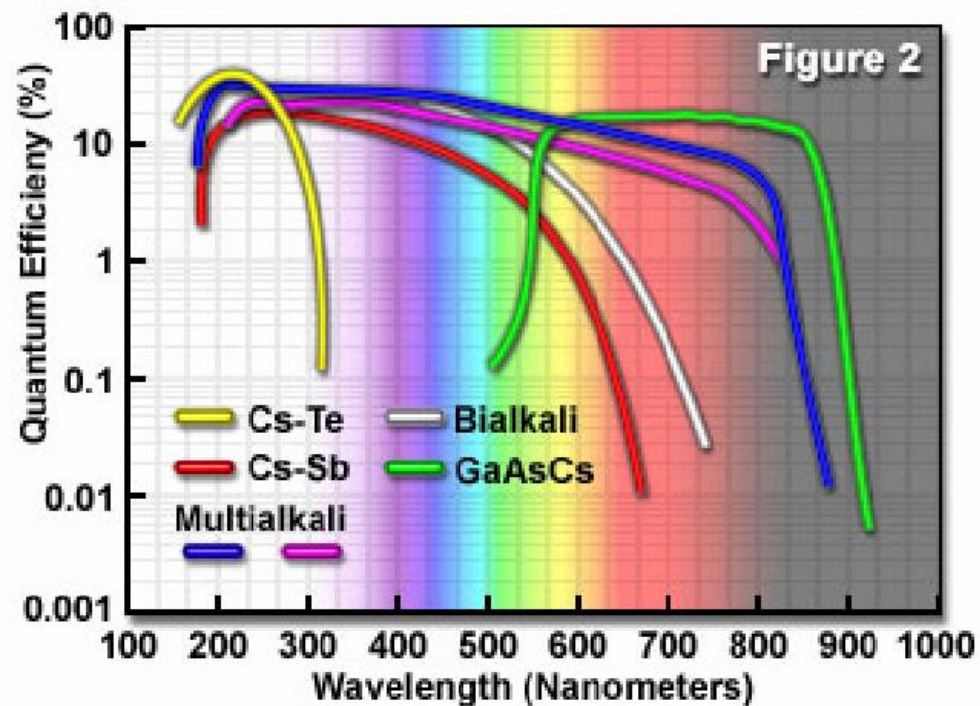
Secondary emission:

in each dynode some (3~5) are emitted

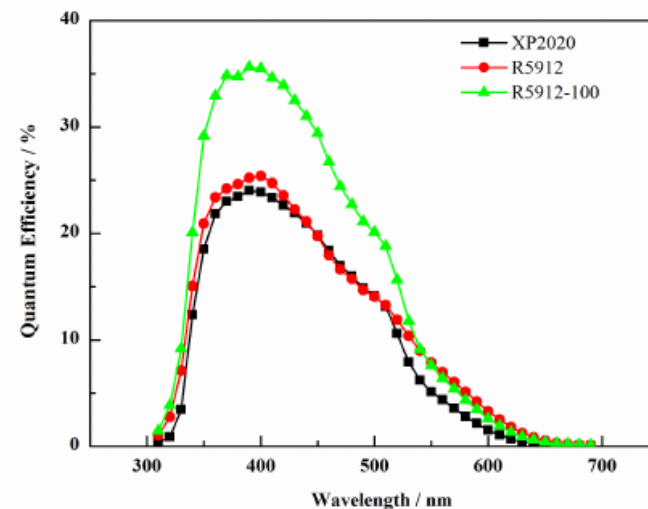
10 dynodes =  $4^{10} = 10^6$



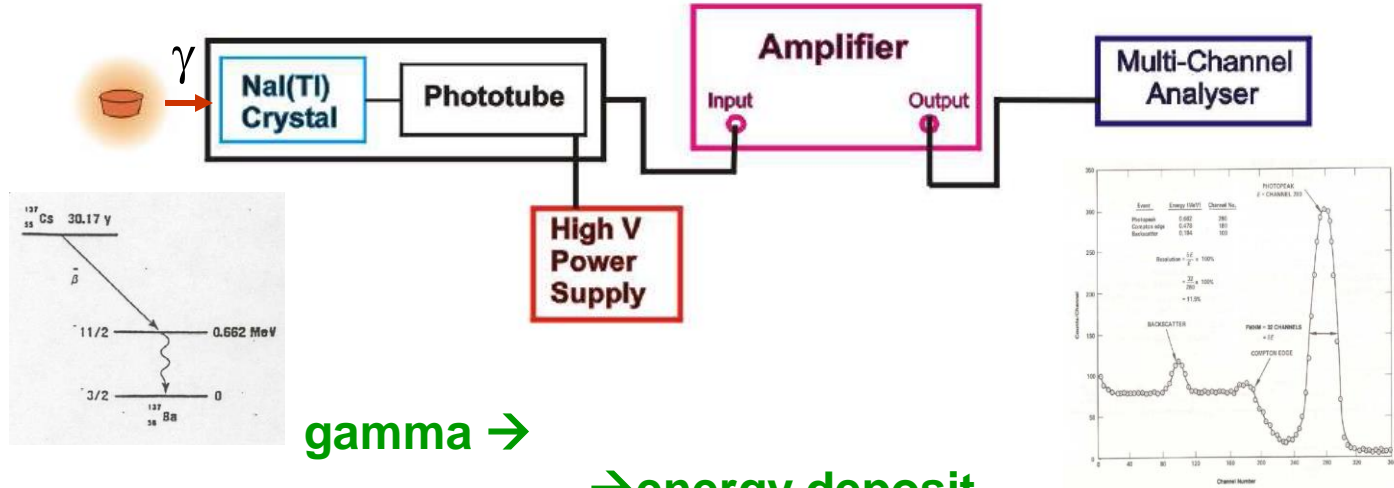
## Photocathode Spectral Responses



## 3 example models of PMT



# Application: gamma spectroscopy: NaI + PMT



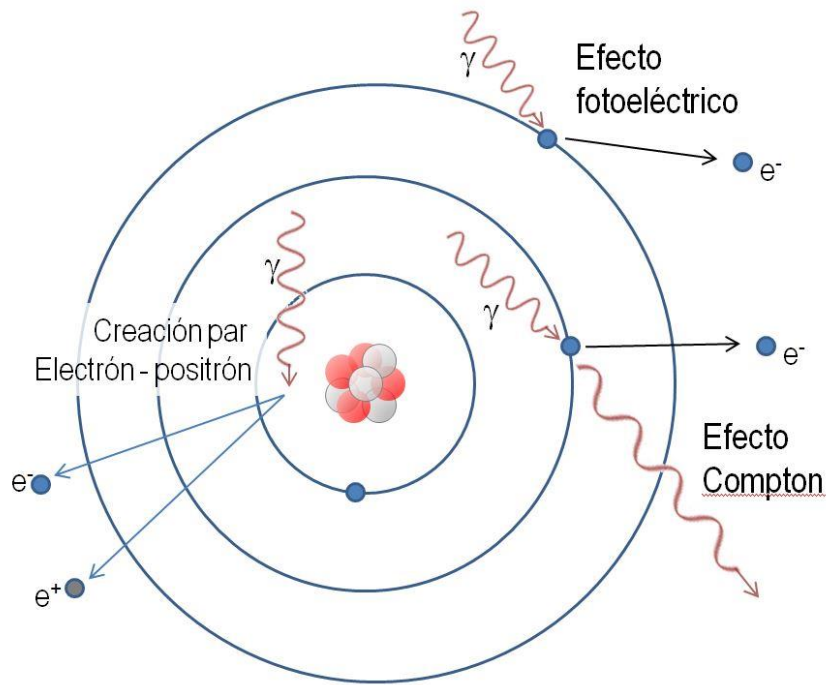
gamma →

- energy deposit
- crystal excitation
- scintillation light
- photoelectrons
- secondary emission →
- charge!

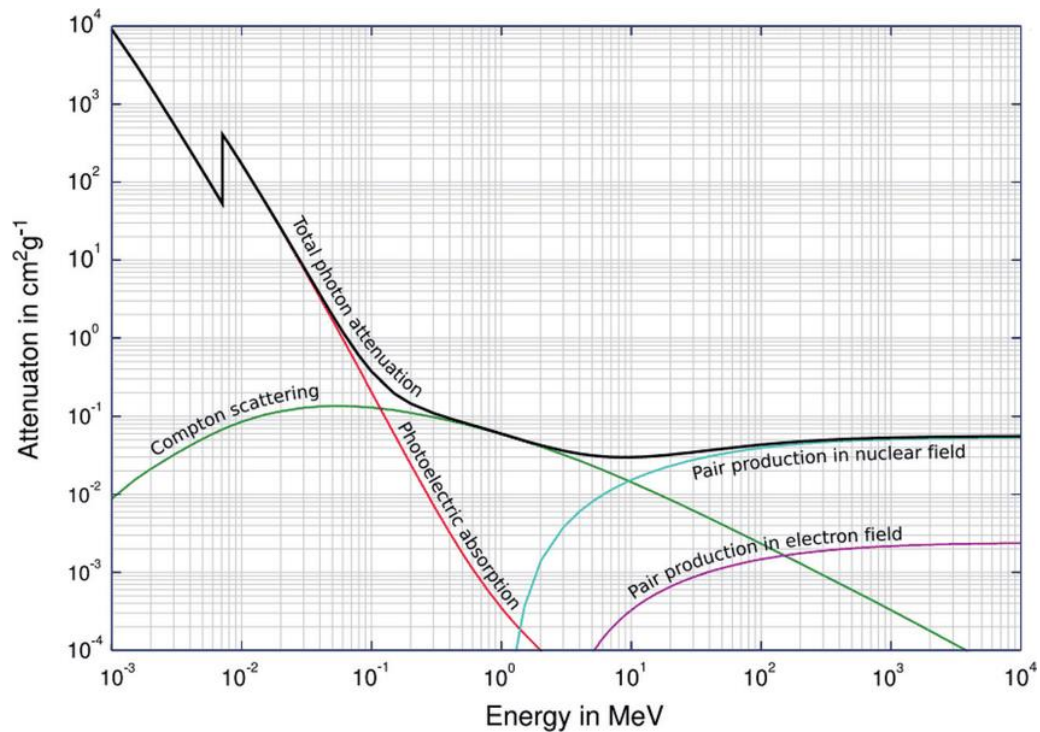
# Gamas

Processos de interacção

# 3 efeitos



$$\begin{aligned}\sigma_{\text{fotoeléctrico}} &\propto Z^5 \\ \sigma_{\text{compton}} &\propto Z \\ \sigma_{\text{pair}} &\propto Z^2\end{aligned}$$



# Efeito Fotoelétrico

- Fotão ( $\gamma$ ) é totalmente absorvido
  - Absorvido → Deposita toda a energia
  - Não absorvido → Não deposita
- Energia absorvida por electrão atómico que adquire uma energia de :

$$T_e = E_\gamma - \Phi$$

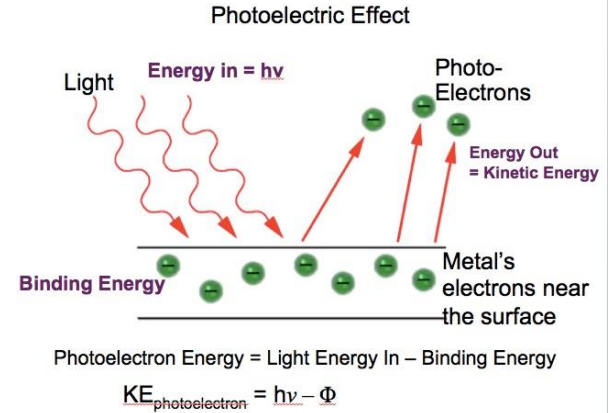
$E_\gamma = h\nu$  :Energia fotão

$\Phi$  :Energia ligação

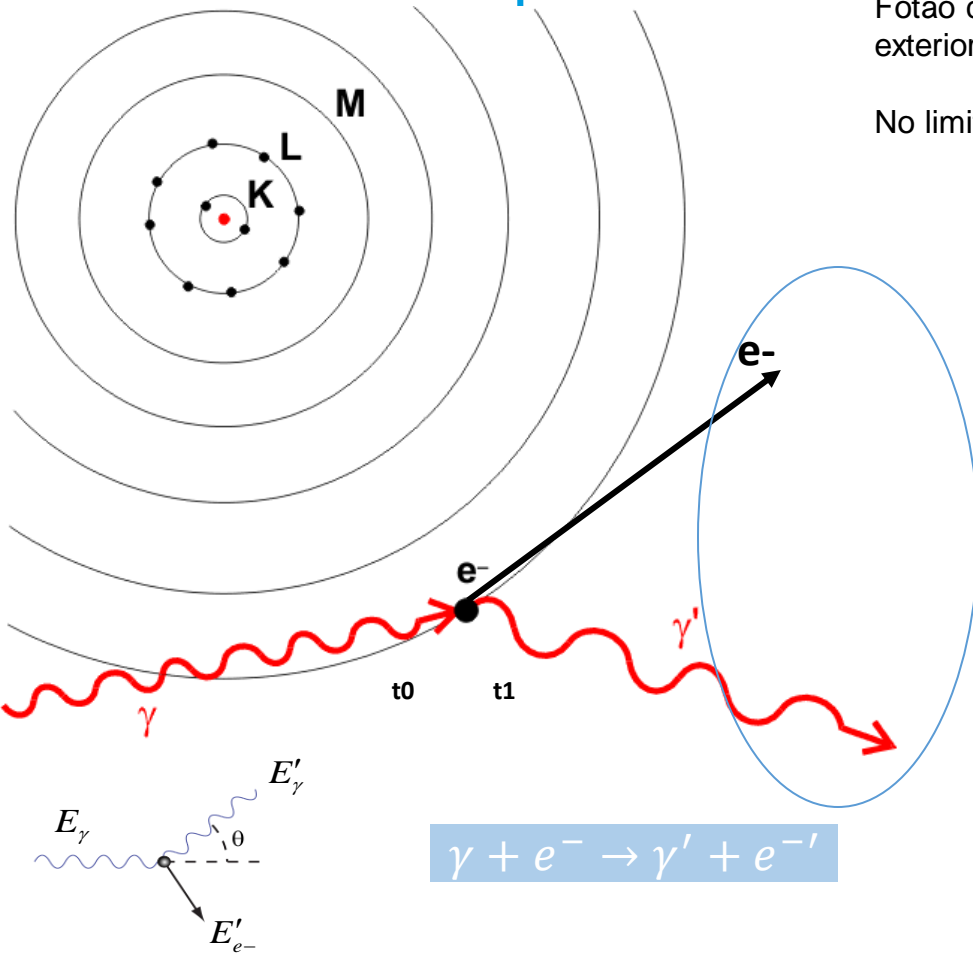
- Secção eficaz:

$$\sigma_{ph} \sim Z^5 \left( \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \right)^3$$

- Importante para baixas Energias (<100keV) e **Z** altos
- Resultado: 1 electrão energético e uma posição vaga
  - Ionização
  - Emissão de um Rx ou Electrão de Auger no rearranjo  
(Nota: electrão de Auger é **como se** o Rx fosse absorvido no próprio átomo)



# Difusão de Compton



Fotão colide (scattering) com um electrão das camadas exteriores (quase livre, com baixa energia)

No limite em que Energia é nula:

Conservação Energia e momento

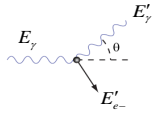
$$\begin{aligned} E_{\gamma} + m_e c^2 &= E'_{\gamma} + E'_e \\ p_{\gamma} &= p'_{\gamma} \cos \theta \\ 0 &= p'_{\gamma} \sin \theta \end{aligned}$$

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

$$T'_e \equiv E'_e - m_e c^2 = E_{\gamma} - E'_{\gamma}$$



# Difusão de compton



$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

Limite  $\theta = 0^\circ$

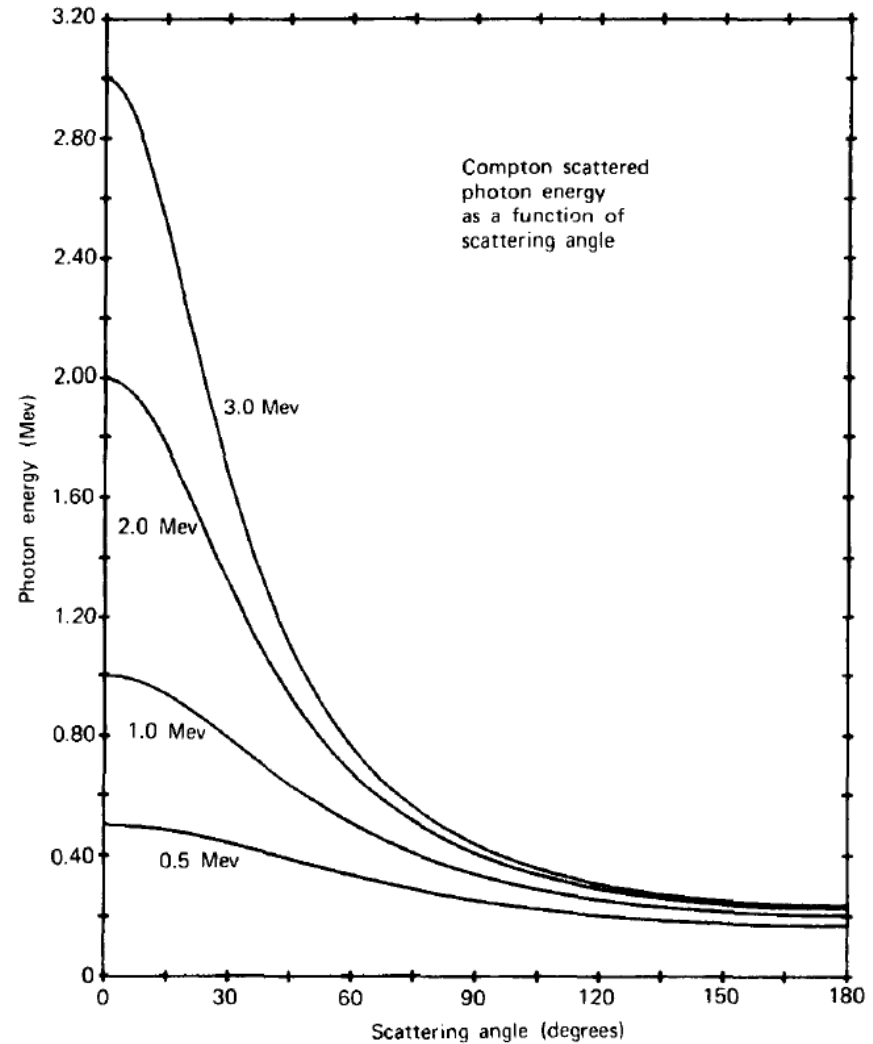
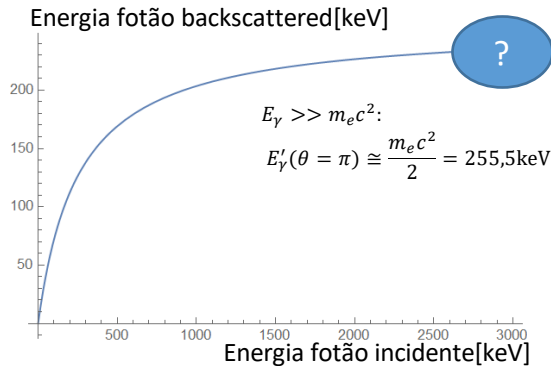
$$E'_\gamma = E_\gamma$$

$$E'_e = ???$$

Limite  $\theta = 180^\circ$

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + 2 \frac{E_\gamma}{m_e c^2}}$$

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + 2 \frac{E_\gamma}{511 \text{ keV}}}$$



# Difusão de compton

## • Secção eficaz Compton

### • Klein-Nishina formula

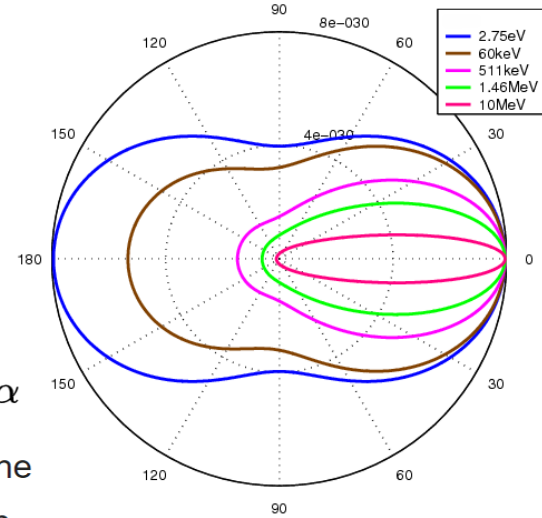
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} \alpha^2 r_c^2 P(E_\gamma, \theta)^2 [P(E_\gamma, \theta) + P(E_\gamma, \theta)^{-1} - \sin^2(\theta)]$$

where  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  is a **differential cross section**,  $d\Omega$  is an infinitesimal solid angle **element**,  $\alpha$  is the **fine structure constant** ( $\sim 1/137.04$ ),  $\theta$  is the **scattering angle**;  $r_c = \hbar/m_e c$  is the "reduced" **Compton wave length** of the electron ( $\sim 0.38616$  pm);  $m_e$  is the mass of an electron ( $\sim 511$  keV/ $c^2$ ); and  $P(E_\gamma, \theta)$  is the ratio of photon energy after and before the collision:

$$P(E_\gamma, \theta) = \frac{1}{1 + (E_\gamma/m_e c^2)(1 - \cos \theta)} = \frac{\lambda}{\lambda'}$$

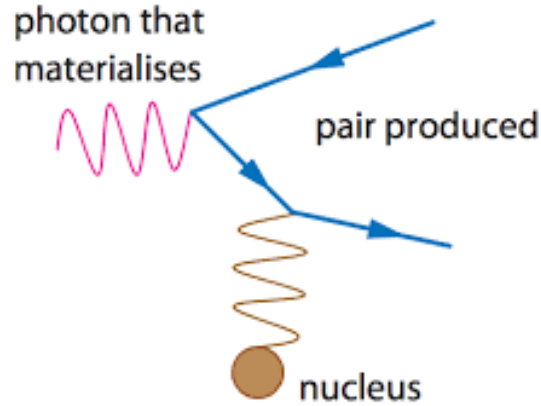
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_e^2 \left( \frac{\lambda}{\lambda'} \right)^2 \left[ \frac{\lambda}{\lambda'} + \frac{\lambda'}{\lambda} - \sin^2(\theta) \right]$$

$$\text{Where } r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2.818 \text{ fm}$$



(per electron)

# Produção de pares



$$\gamma + \gamma^* \rightarrow e^+ + e^-$$

Criação de um par electrão-positrão (no campo do átomo)

Energia mínima :

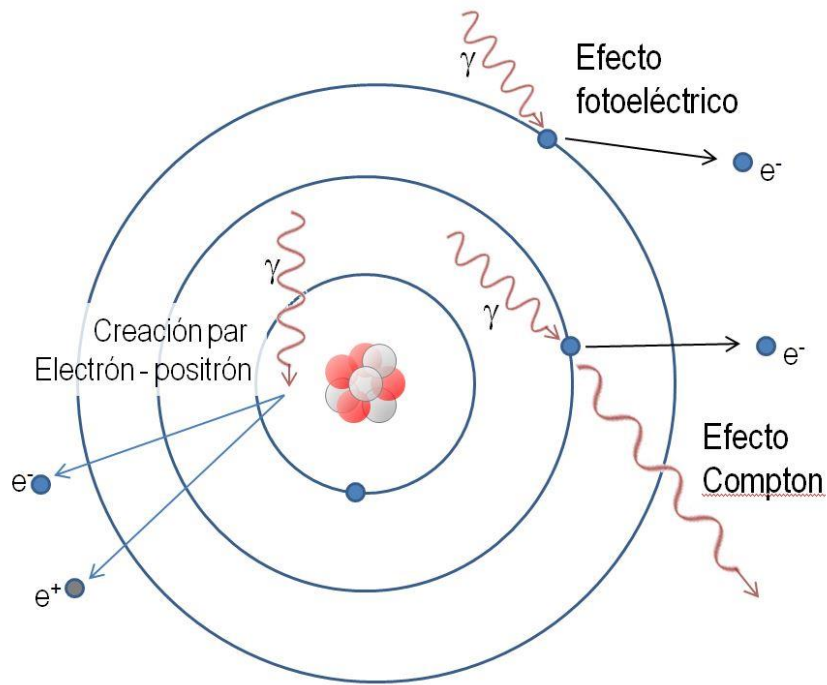
$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 (= 1022 \text{ keV})$$

Secção eficaz

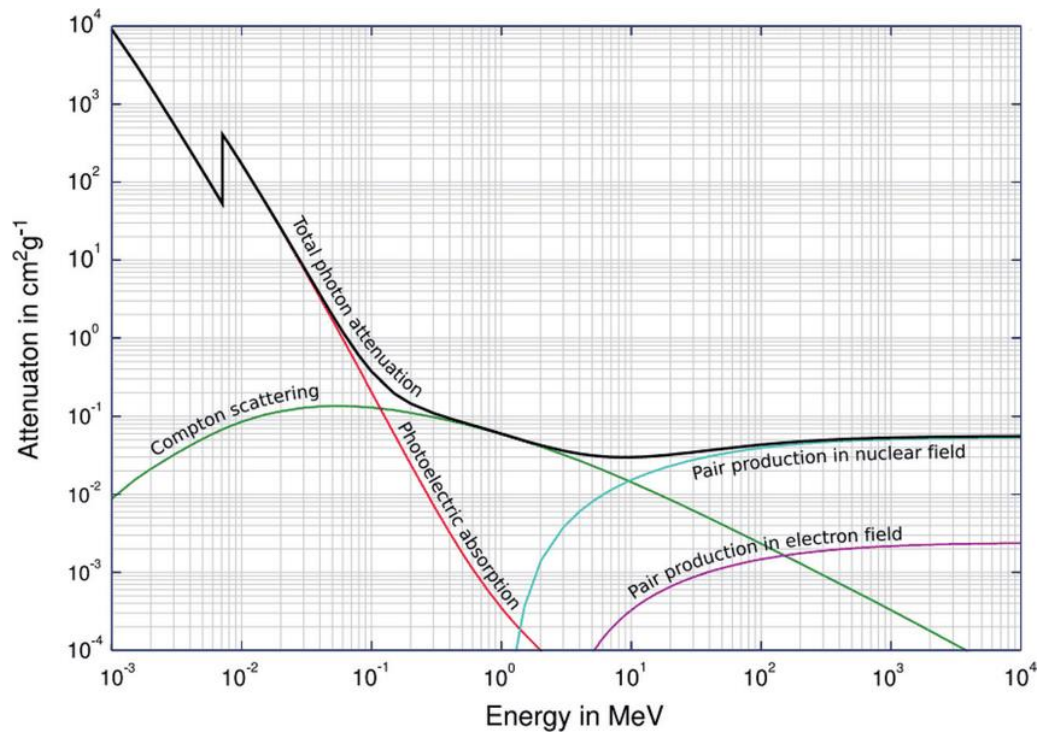
$$\sigma_{pair} \sim 4 \alpha Z^2 r_e^2 \left[ \frac{7}{9} \ln \left( \frac{183}{Z^{1/3}} \right) \right] \sim \frac{7}{9} \frac{A}{N_A} \frac{1}{X_0}$$

Importante para altas energias

# 3 efeitos



$$\begin{aligned}\sigma_{\text{fotoeléctrico}} &\propto Z^5 \\ \sigma_{\text{compton}} &\propto Z \\ \sigma_{\text{pair}} &\propto Z^2\end{aligned}$$

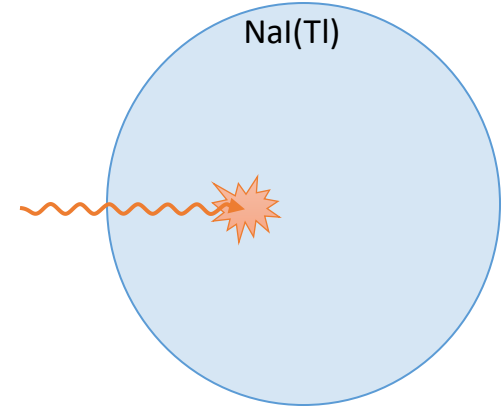


# Gamas

Espectro de energia

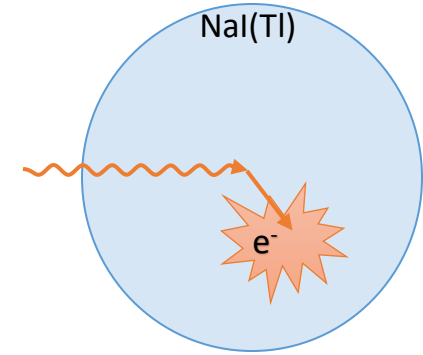
# Recorded energy

- Um gama com energia  $E = h\nu$
- Abstraindo das especificidades do detector
- Naïve expectation



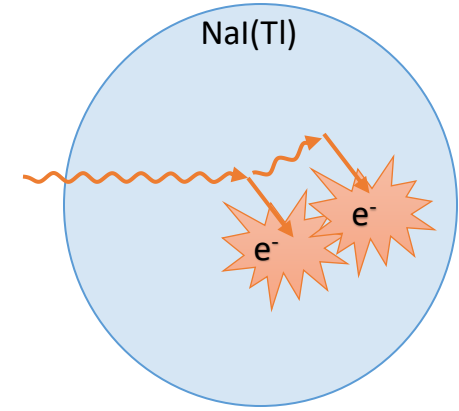
# Recorded energy

- Fotoelétrico
- Electrão resultante excita material



# Recorded energy

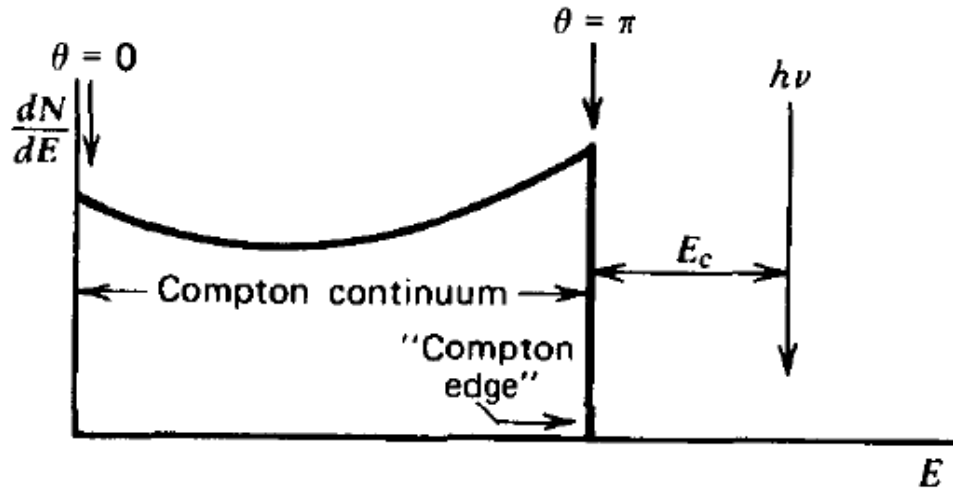
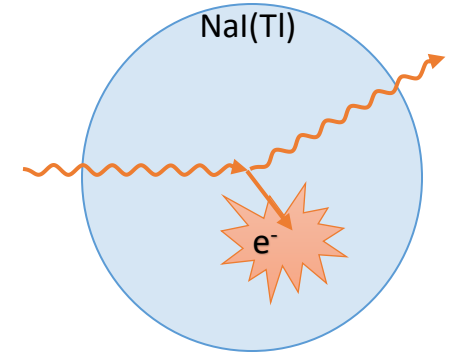
- Compton + fotoeléctrico no difundido





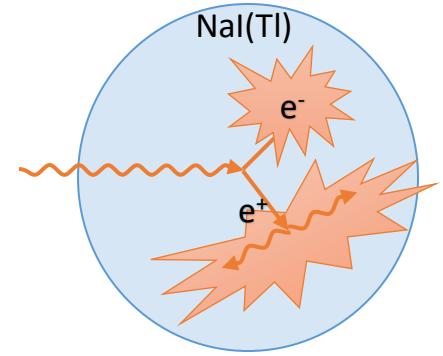
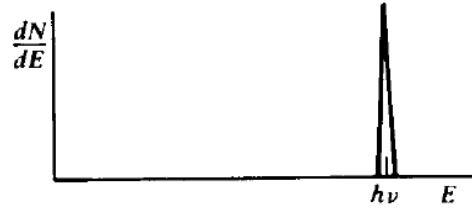
# Recorded energy

- Uma interacção de Compton
- Fóton difundido escapa
- Energia do electrão depositada



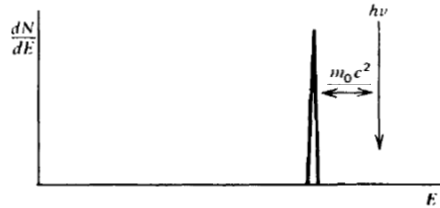
# Recorded energy

- Produção de pares

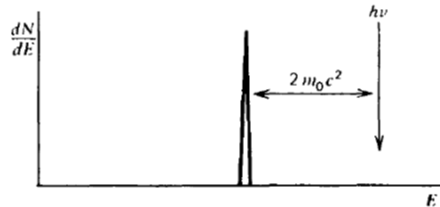


# Recorded energy

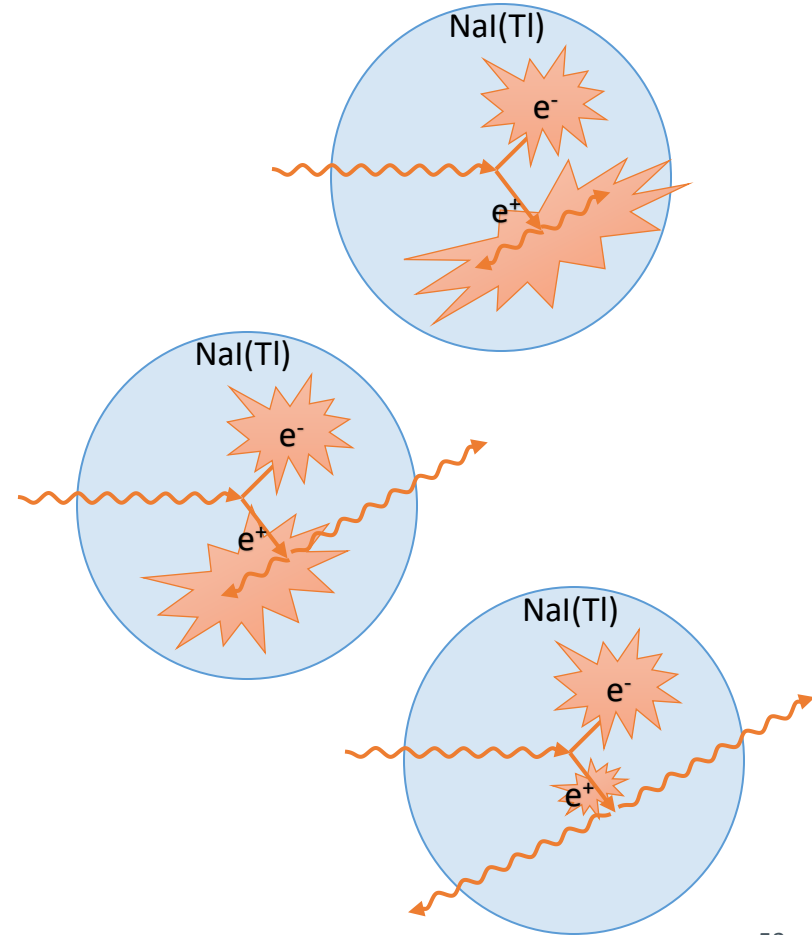
- Produção de pares



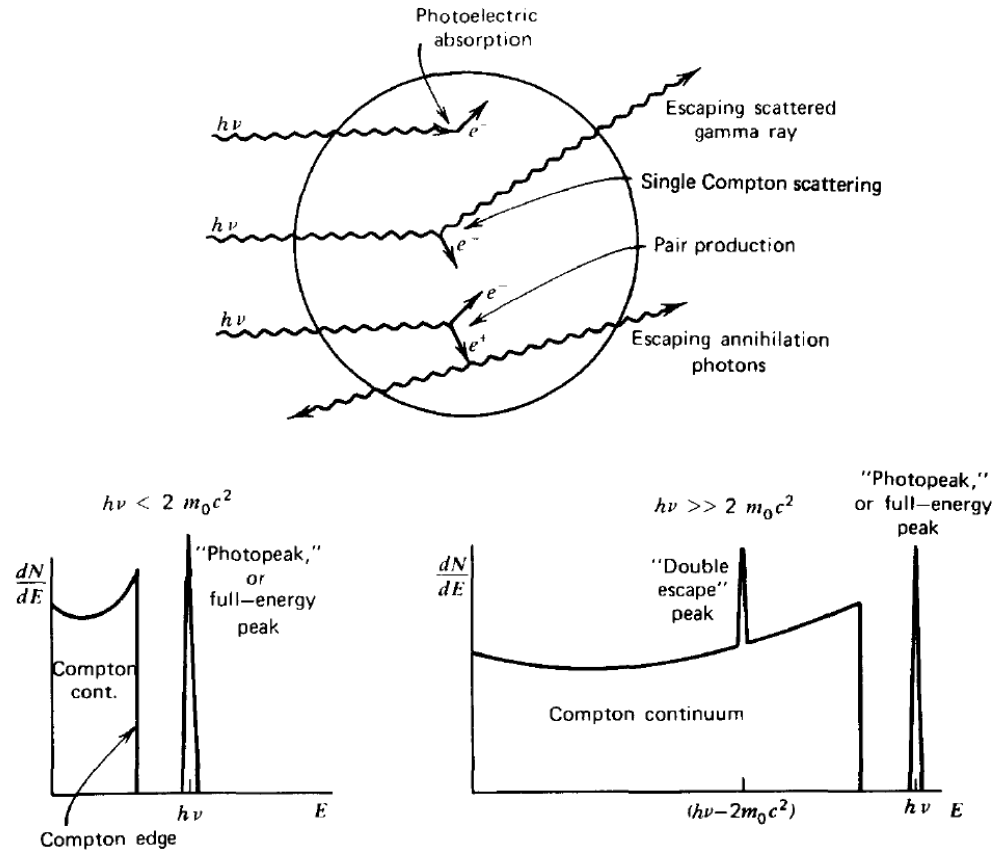
Escape simples



Escape duplo

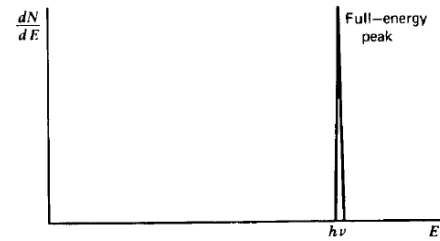
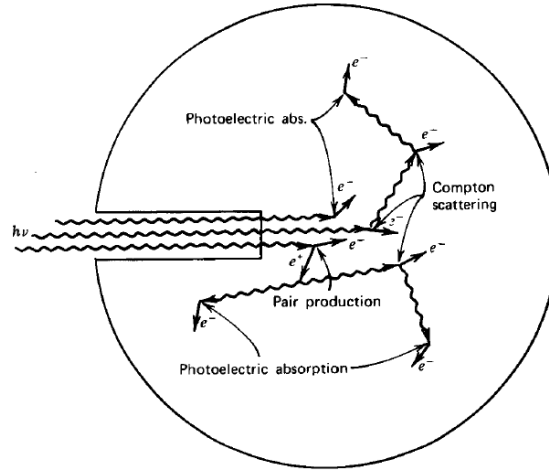


# Small detector

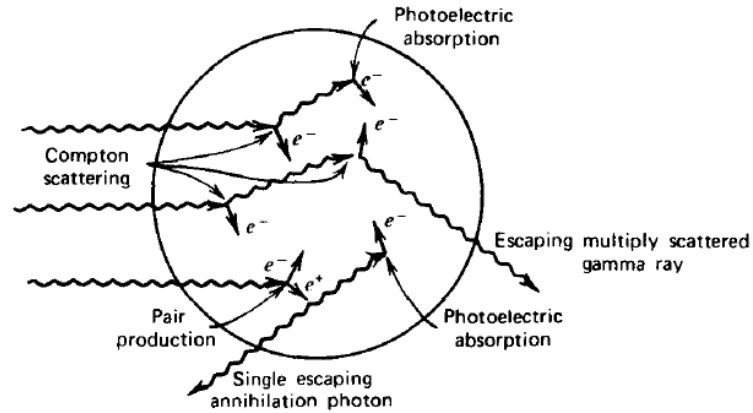


**Figure 10.2** The “small detector” extreme in gamma-ray spectroscopy. The processes of photoelectric absorption and single Compton scattering give rise to the low-energy spectrum at the left. At higher energies, the pair production process adds a double escape peak shown in the spectrum at the right.

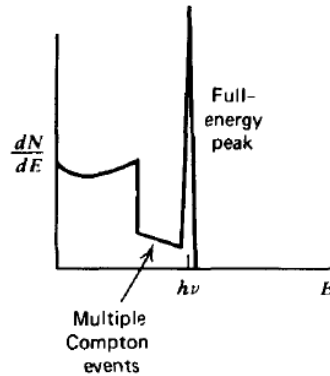
# Big detector



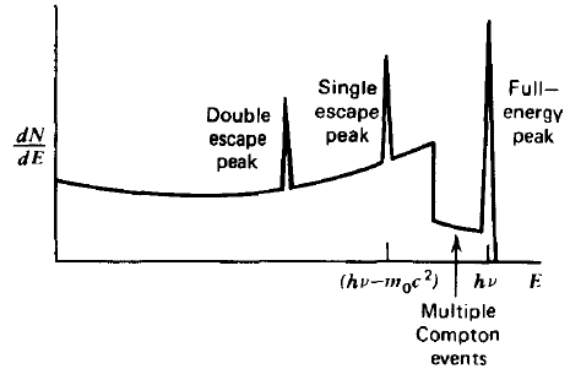
“mais ou menos”



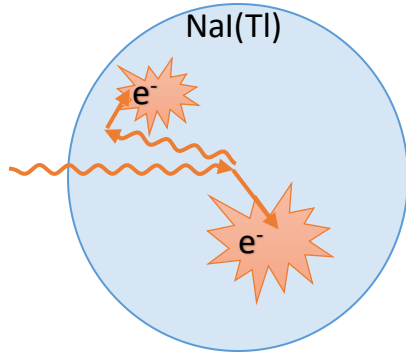
$$h\nu < 2m_0c^2$$



$$h\nu \gg 2m_0c^2$$

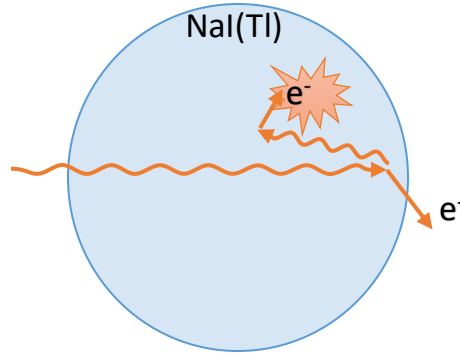


# Complications - backscatter



Compton + fotoelectrico

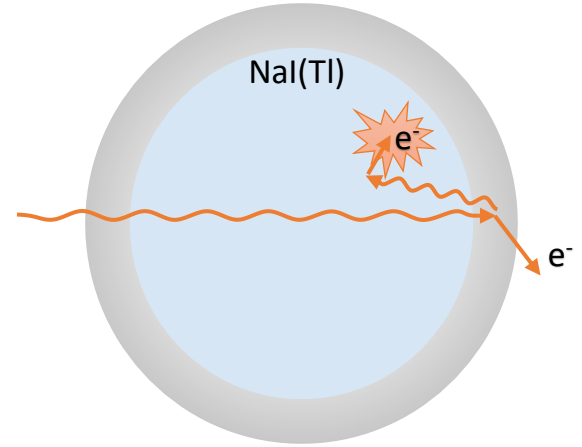
Toda a energia



Compton a um ângulo elevado  
perto da borda

- Fóton volta para detector e faz fotoeléctrico
- Electrão sai

Apenas Energia do fóton difundido

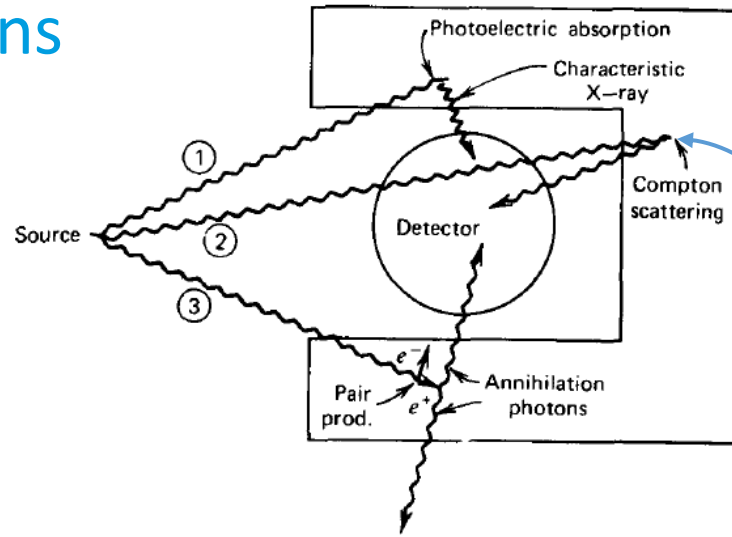


Compton a um ângulo elevado no  
invólucro ou shielding

- Fóton volta para detector e faz fotoeléctrico
- Electrão perde-se

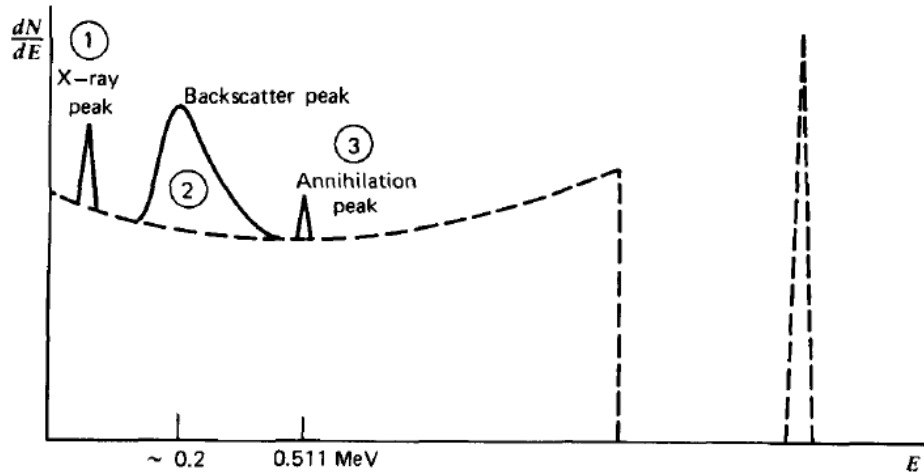
Apenas Energia do fóton difundido

# Complications



Vários ângulos possíveis:  
Várias energias do fóton

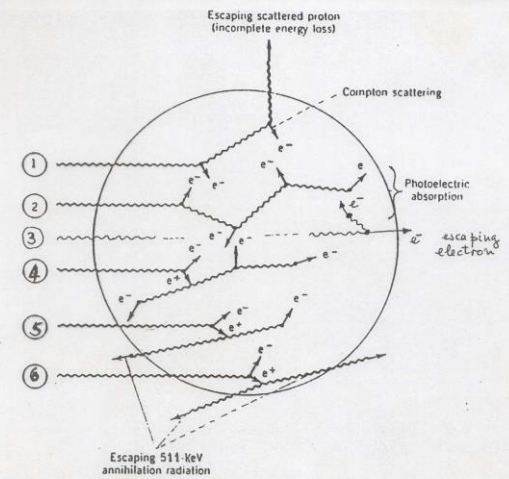
Energia mínima do fóton:  
Backscattering (ângulo  $180^\circ$ )



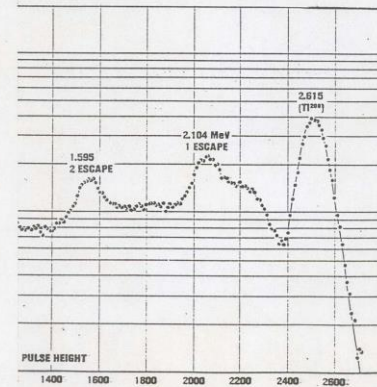


# Sumário espectros

1.  $\gamma$  faz difusão de Compton.  $\gamma$  difundido abandona o detector  
→ patamar de Compton
2.  $\gamma$  faz difusão de Compton.  $\gamma$  difundido faz fotoeléctrico. Toda energia é recolhida  
→ Pico de absorção total
3.  $\gamma$  faz retrodifusão (transferencia grande E para electrão e este abandona o detector. Apenas E do fotão difundido absorvido  
→ "pico" a  $E = E_{\text{total}} - E_{\text{electrao compton}}$
4.  $\gamma$  faz par  $e^+ e^-$ . O positrão aniquila-se gerando dois fotões de 511keV. Fotões são absorvidos  
→ Pico absorção total
5. Igual anterior mas 1 fotão escapa  
→ Pico deslocado  $E = E_{\text{total}} - 511\text{keV}$  (pico escape simples)
6. Igual anterior mas 2 fotões escapam  
→ Pico deslocado  $E = E_{\text{total}} - 1022\text{keV}$  (Pico escape duplo)



Diferentes casos contribuindo para os espectros de energia

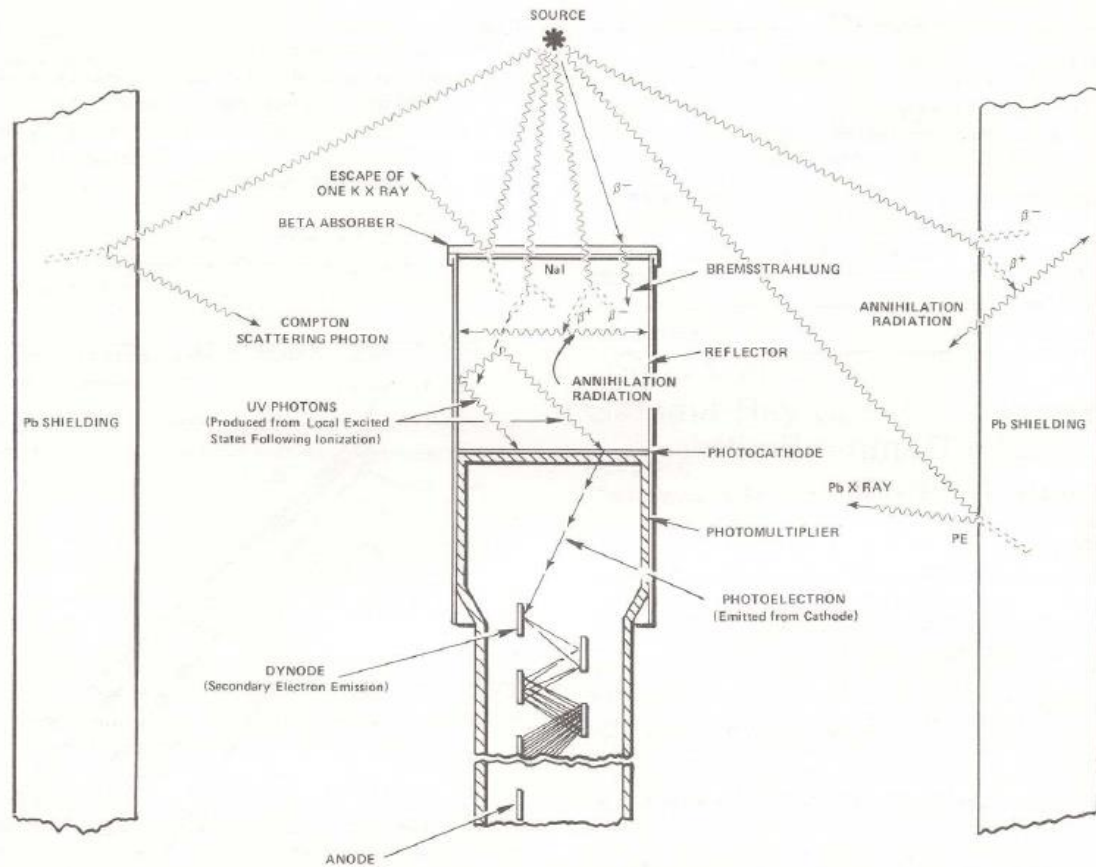


Espectro de energia do Tólio-208: observam-se os picos de absorção total, de escape simples e duplo.



TÉCNICO LISBOA

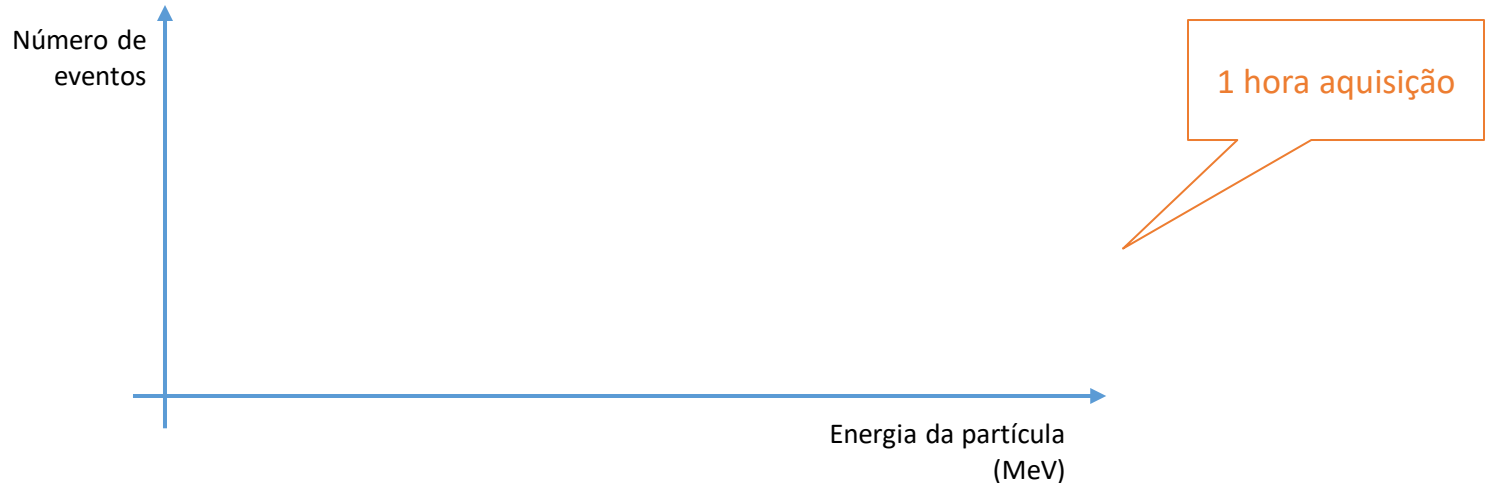
# NaI + PMT



# Medida certinha

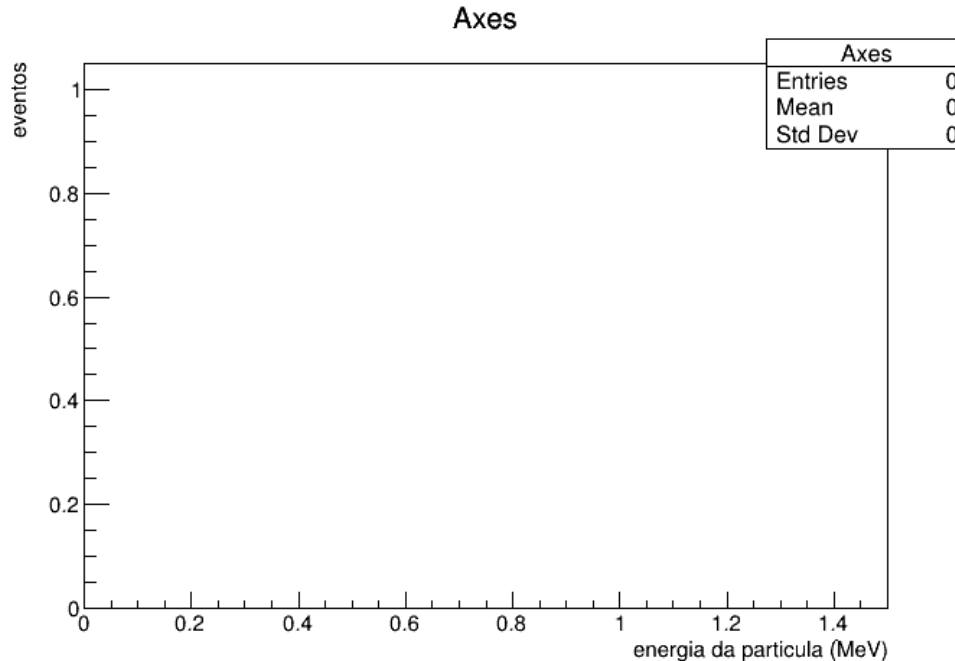
- Uma fonte emite, em média, 20 partículas por minuto com uma energia de 1 MeV. Como será o espectro de energia registado?

Espectro de energia: Distribuição do número de eventos segundo as diferentes energias das partículas



# Medida certinha

- Uma fonte emite, em média, 20 partículas por minuto com uma energia de 1 MeV. Como será o espectro de energia registado?

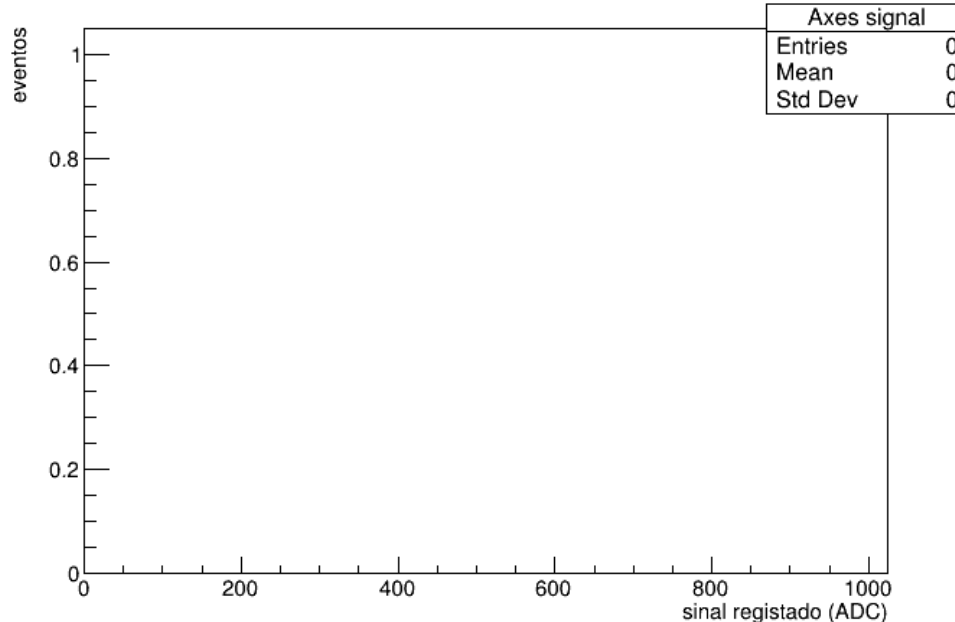


# Medida certinha

- Uma fonte emite, em média, 20 partículas por minuto com uma energia de 1 MeV. Como será o espectro de energia registado?

Não temos acesso à energia da partícula mas sim a um sinal eléctrico, medido por uma ADC  
(10 bits de resolução ->  $2^{10}$  níveis = 1024 níveis)

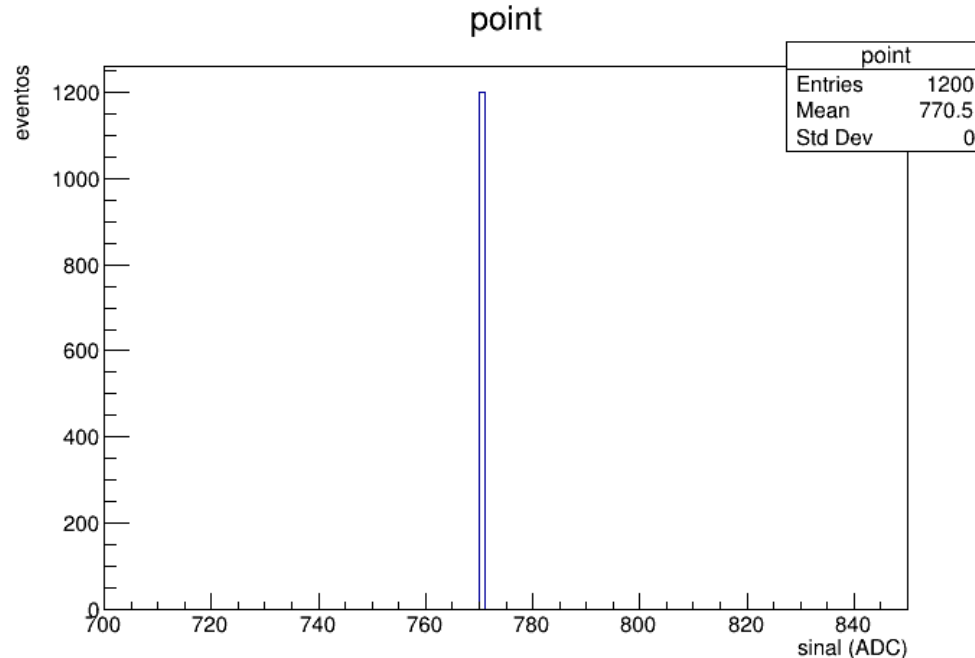
Axes signal



# Medida certinha

- Uma fonte emite, em média, 20 partículas por minuto com uma energia de 1 MeV. Como será o espectro de energia registado?

Imaginando um detector ideal, com uma electrónica ideal



Não há mais  
informação além de:

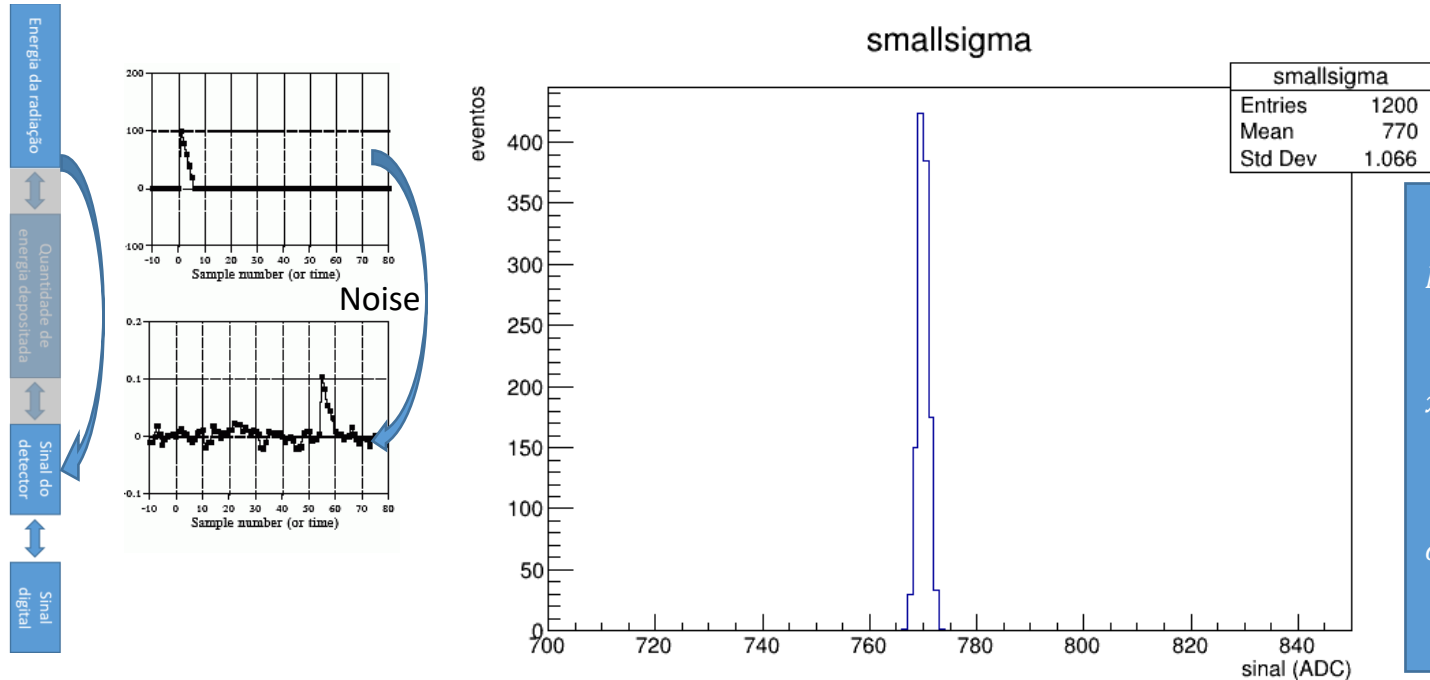
“existem 1200  
acontecimentos no bin  
[770,771[“

“registaram-se 1200  
eventos com sinal  
entre 770 e 771 em  
unidades ADC”

# Medida certinha

- Uma fonte emite, em média, 20 partículas por minuto com uma energia de 1 MeV. Como será o espectro de energia registrado?

Imaginando um detector ideal, com uma electrónica assim-assim



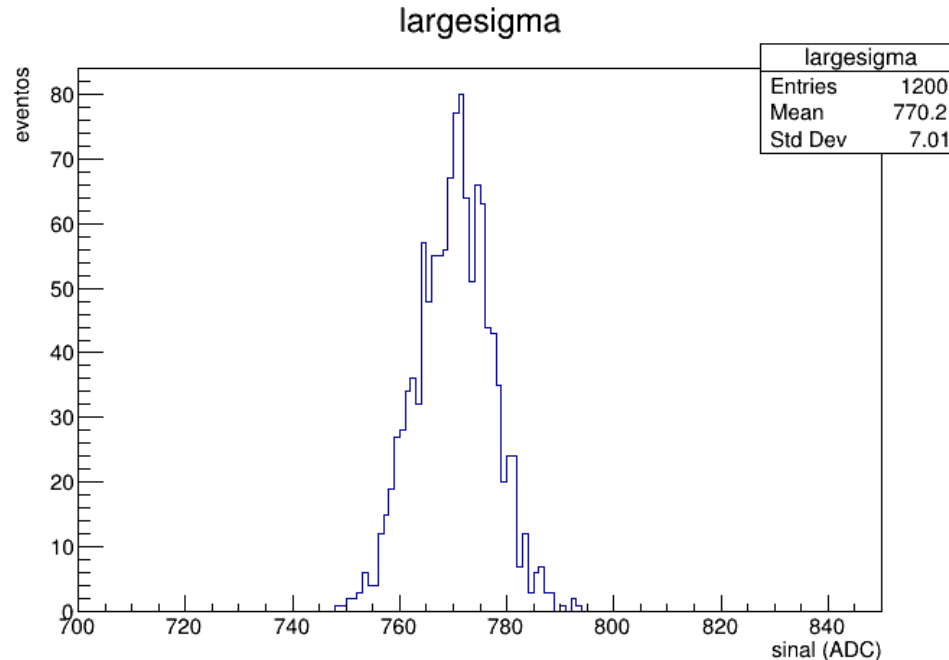
$$N = \sum_{i=0}^{1023} N_i = 1200$$
$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{1023} x_i N_i = 770$$
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{1023} (x_i - \bar{x})^2 N_i} = 1.1$$



# Medida certinha

- Uma fonte emite, em média, 20 partículas por minuto com uma energia de 1 MeV. Como será o espectro de energia registado?

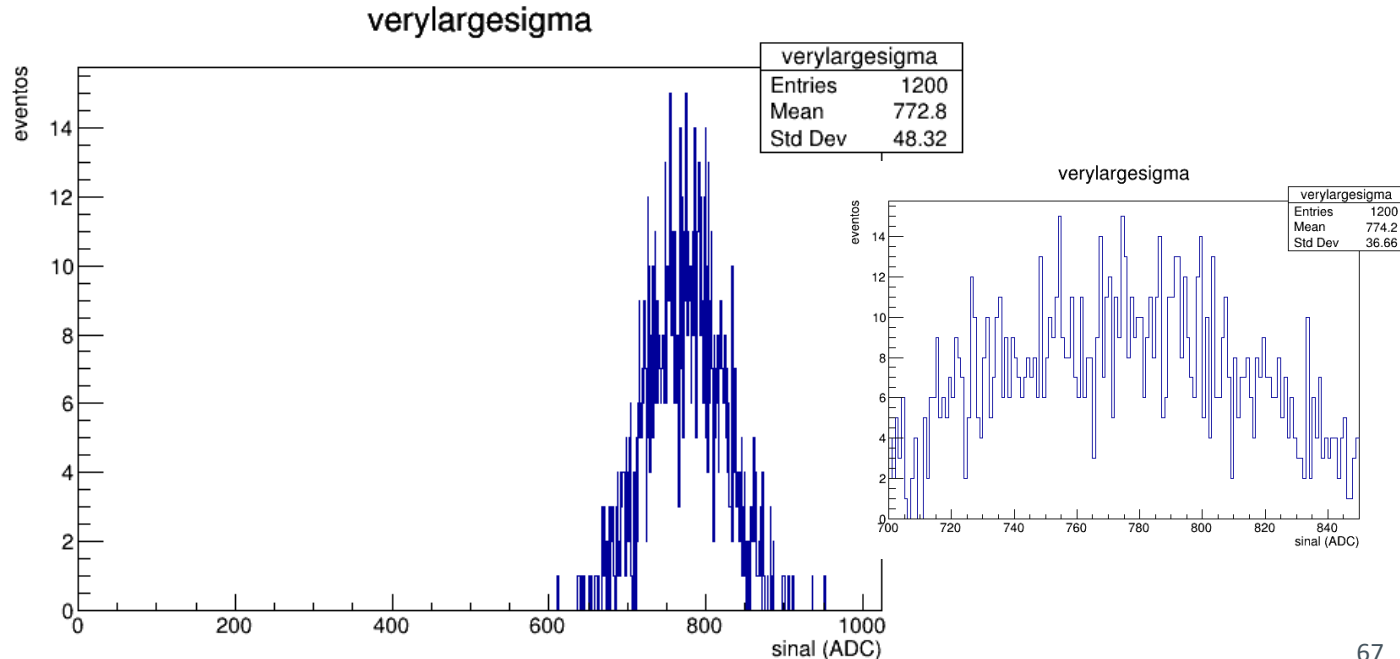
Imaginando um detector com uma resolução em energia, com uma electrónica assim-assim



# Medida certinha

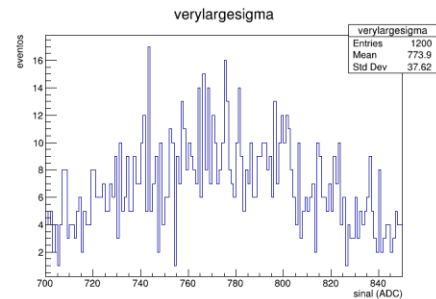
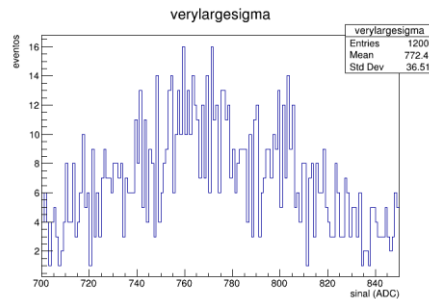
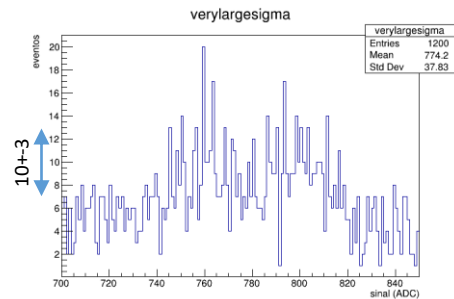
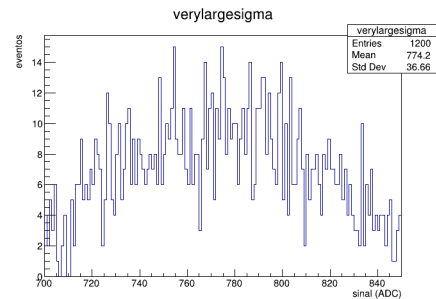
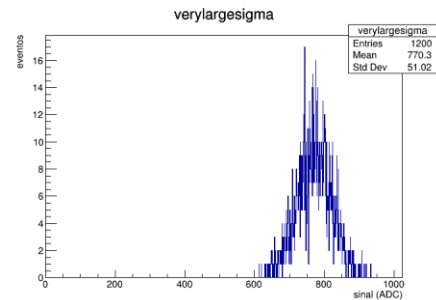
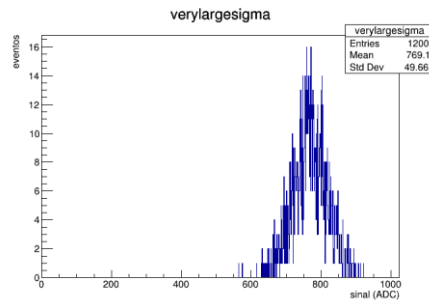
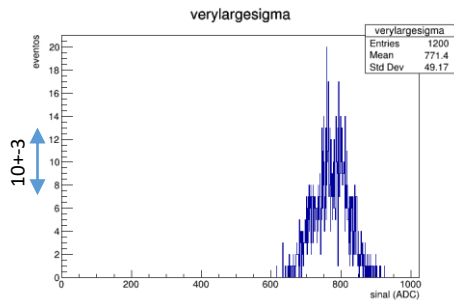
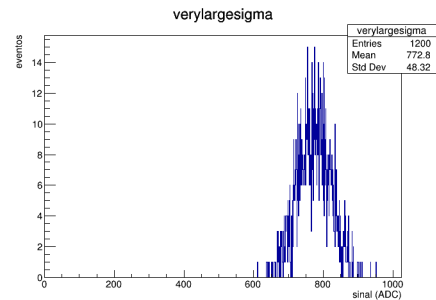
- Uma fonte emite, em média, 20 partículas por minuto com uma energia de 1 MeV. Como será o espectro de energia registado?

Imaginando um detector com uma má resolução em energia, com uma electrónica assim-assim



# Flutuações

- Gerando sempre números aleatórios de acordo com uma gaussiana com exactamente os mesmos parâmetros.



# Gamas

Detection characteristics

# Characteristics of the detectors

**Sensitivity**

**Response/linearity**

**Efficiency**

**Energy resolution**

**Dead Time**

**=> Application NaI + PMT**

# NaI + PMT – Generic characteristics

## Sensitivity

The detector response to a certain radiation (type, energy).

Depends on the cross sections and on the detector mass involved

$\alpha/\beta$  – highly ionizing

$\gamma$  - smaller cross section  $\rightarrow$  more mass  $\rightarrow$  more volume

Noises and energy losses are relevant:

- Cannot detect below noise level
- Cannot detect if a lot energy is lost. E.g. window

## Plastic and crystals for photons

### Plastic

Low  $Z \rightarrow$  low photopeak efficiency

Low Light Yield  $\rightarrow$  Bad peak resolution

### Crystal

High  $Z \rightarrow$  Good photopeak efficiency

High Yield  $\rightarrow$  Good resolution

# NaI + PMT – Generic characteristics

## Response and linearity

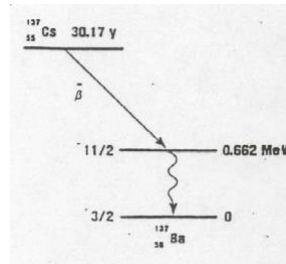
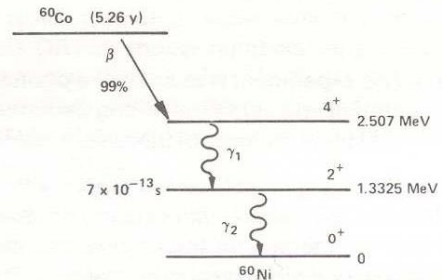
If detector large enough  $\rightarrow$  gamma is contained  
 $\rightarrow$  All energy is deposited

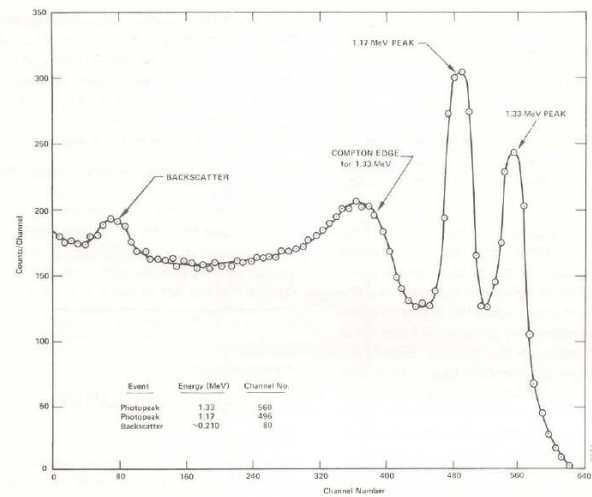
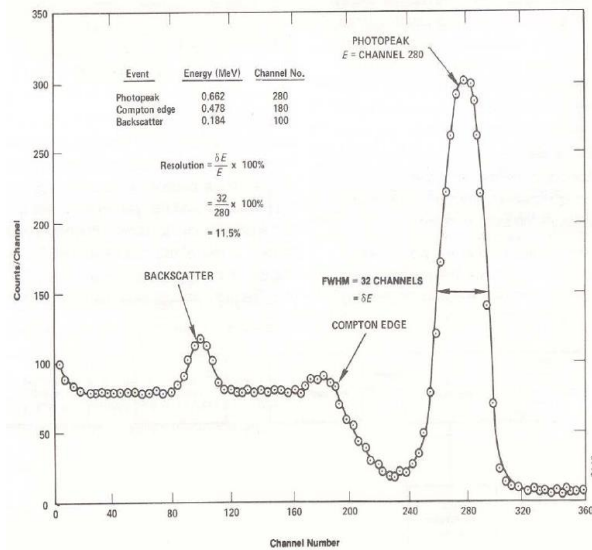
Electrical signal in time  $\rightarrow$  integration  $\rightarrow$  Total charge

**Total charge is proportional to energy**

If the shape is always the same, some parameters are proportional to the Energy  
(e.g. amplitude, time over threshold,...)

If linear, Measured Energy =  $k$  . Measured quantity;  $k$  is the calibration constant





Energia

Canal



# NaI + PMT – Generic characteristics

## Efficiency

$$\varepsilon_{\text{total}} = \text{Detected events} / \text{expected events}$$

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_{\text{intrinsic}} \times \varepsilon_{\text{geometric}}$$

$$\varepsilon_{\text{intrinsic}} = \text{detected events} / \text{incident particles}$$

Depends on cross sections, particle type, energy, volume of detector

$$\varepsilon_{\text{geometric}} = \text{incident particles in detector} / \text{emitted particles by source}$$

Depends on the geometry, angular distribution, solid angle

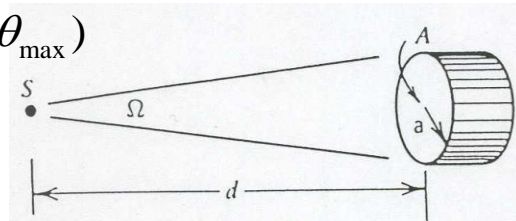
## E.g.: Solid angle calculation

$$\text{Count rate} = \text{Activity} \times \Delta\Omega / 4\pi$$

$$d\Omega = ds / d^2 = d \cos \theta \cdot d\phi \Rightarrow \Delta\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta_{\text{max}})$$

$$\cos \theta_{\text{max}} = d / \sqrt{d^2 + a^2} = 1 / \sqrt{1 + (a/d)^2}$$

$$\Delta\Omega \approx A / d^2$$



# Nal + PMT – Generic characteristics

## Energy resolution

Capacity of the detector to distinguish two values of energy.

Need to take into account the statistics...

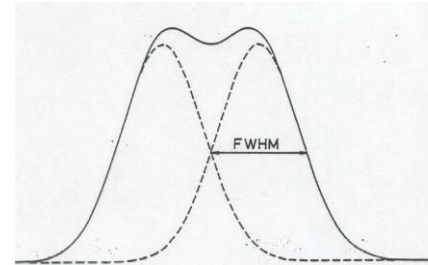
A set of values fluctuating around a mean value

$$R = \frac{\Delta E}{E} = \frac{FWHM}{E}$$

Resolution with energy: R varies with  $1/\sqrt{E}$

Poisson statistics  $\Rightarrow \sigma^2 = N$  ( $\Delta N = FWHM = 2.35 \sigma$ )

$$R = \Delta E / E = \Delta N / N = 2.35/\sqrt{N}$$



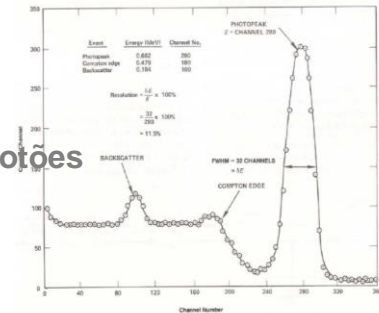
## E.g.: Resolution of Nal + PMT for the photopeak of Cs-137

Deposited Energy  $\Delta E = 662$  [KeV]

Number of photons  $N_\gamma = 662 \times 10^3$  [eV] / 26 [eV/fotão]  $\approx 2.5 \times 10^4$  fotões

Photoelectrons  $N_{pe} = N_\gamma \cdot \varepsilon_{geom} \cdot QE \approx 1.25 \times 10^3$  (eff 5%)

Resolution  $\sim 2.35/\sqrt{N} = 7\%$



# Nal + PMT – Generic characteristics

## Dead time

$\tau$  : the necessary time to process an event

If the detector keeps active during that time: Pile-up! Information lost on both

If the detector blocks: loss of second event.



TÉCNICO LISBOA



TÉCNICO LISBOA