

# Detectors de partículas e radiação

Física da Radiação

2016-2017

# The Standard Model

Sergio Bertolucci

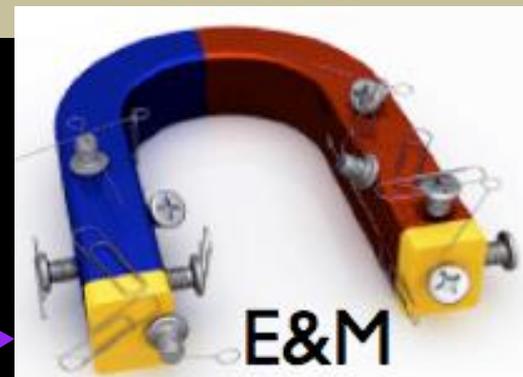
## Quarks



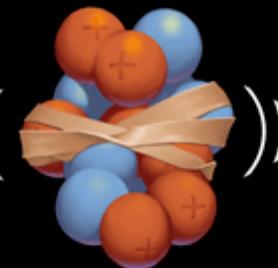
## Leptons



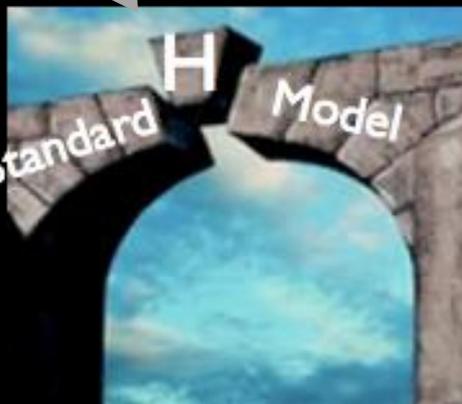
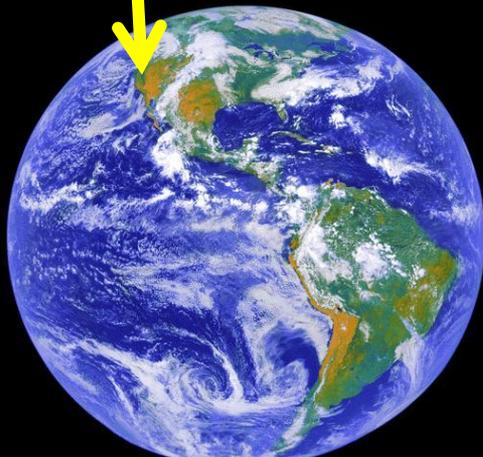
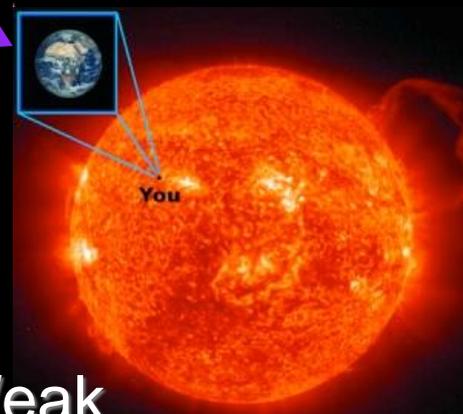
## Forces



Strong



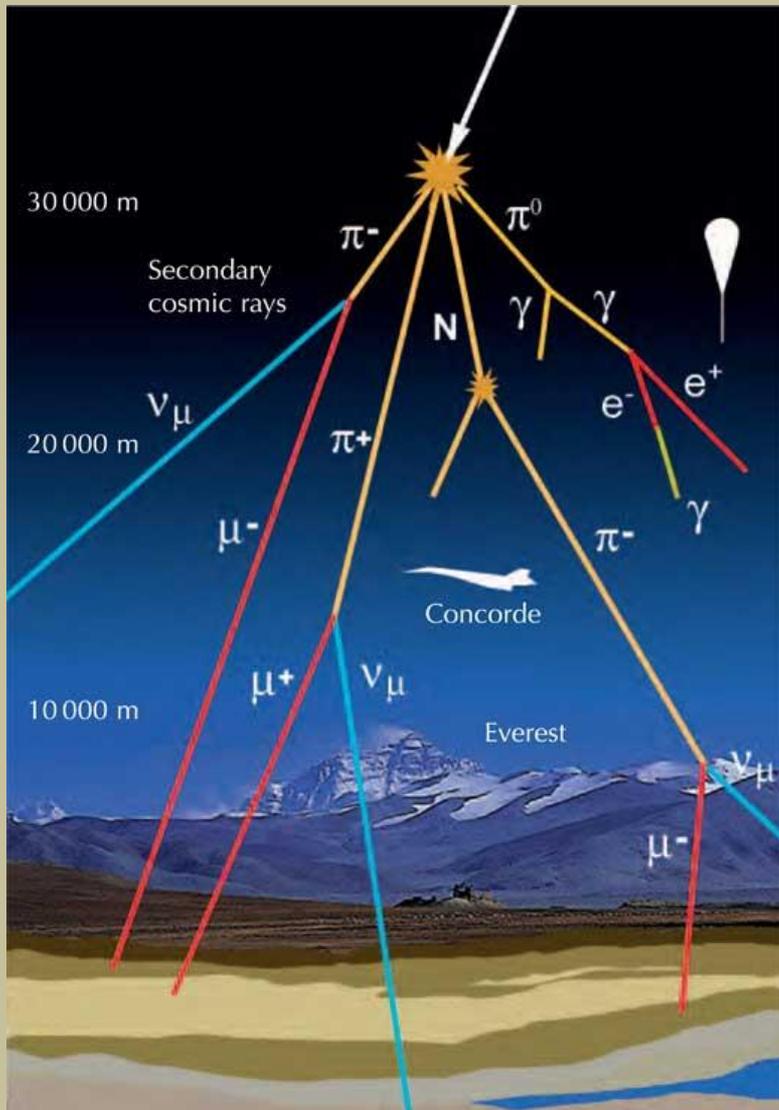
Weak



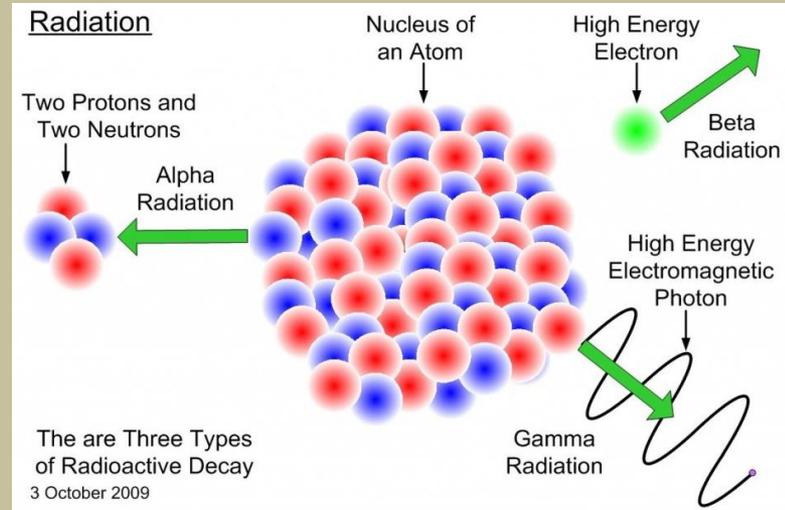
Courtesy of Mario Pimenta

# Sources of radiation

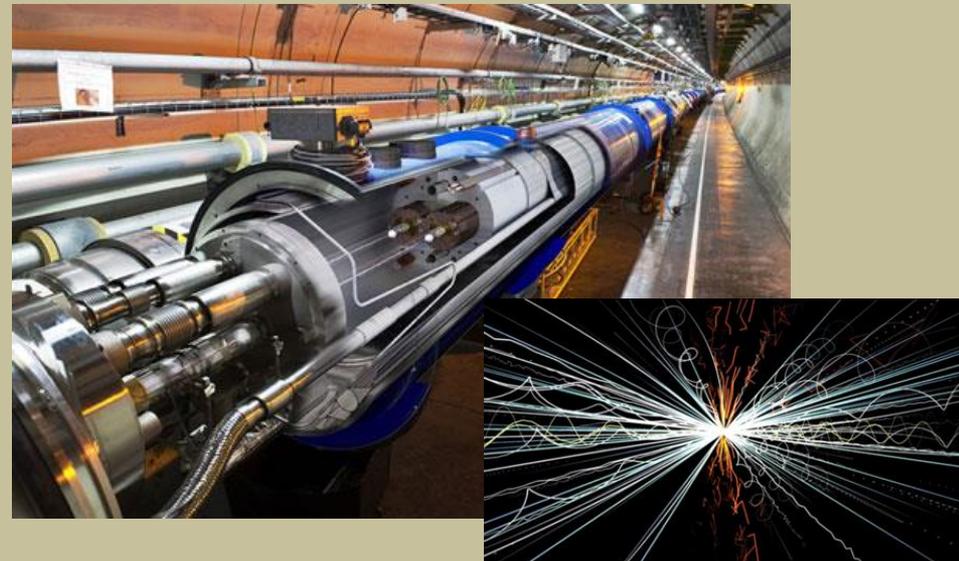
## Cosmic rays



## Radioactivity



## Colliders



# Detecção de partículas

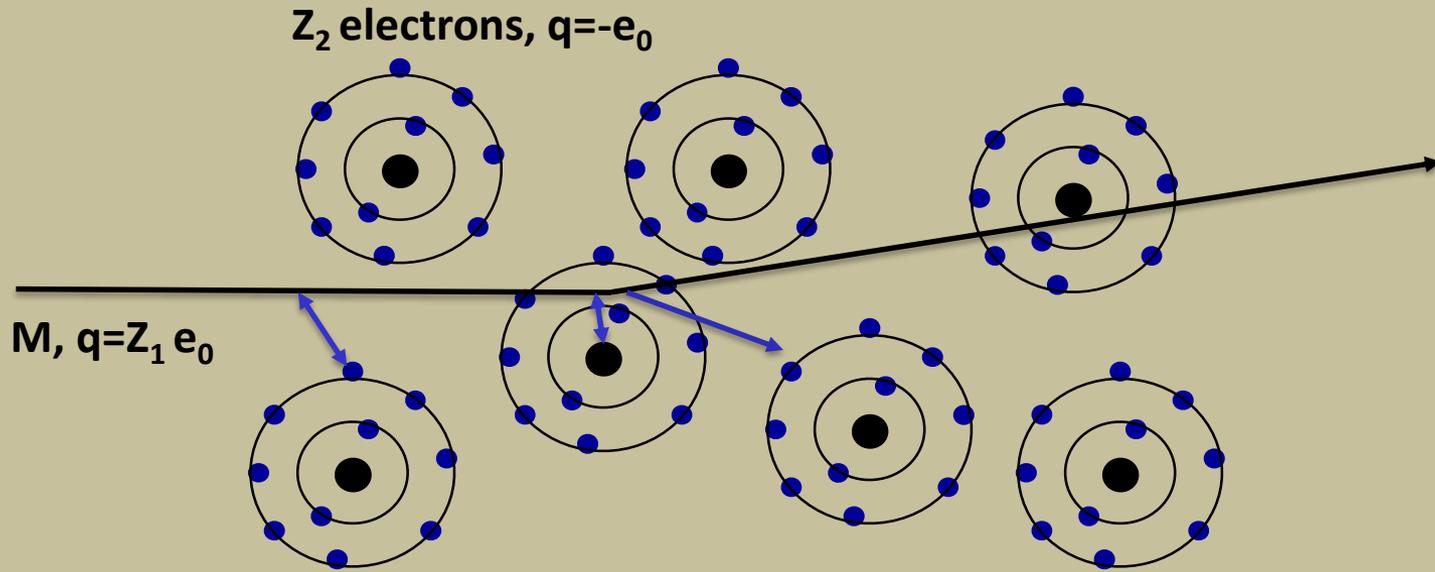
As propriedades da interacção das partículas com a matéria são utilizadas para as caracterizar

Ao atravessar matéria as **partículas carregadas** ionizam o meio ou deixam atrás de si átomos excitados.

Os **fotões** interagem com a matéria produzindo partículas carregadas.

Os **neutrões** interagem com a matéria através de colisões elásticas e inelásticas. Nestas colisões transferem energia para partículas carregadas e podem também ser absorvidos ou capturados pelos núcleos, dando origem a reacções nucleares.

# Interação das partículas carregadas com a matéria



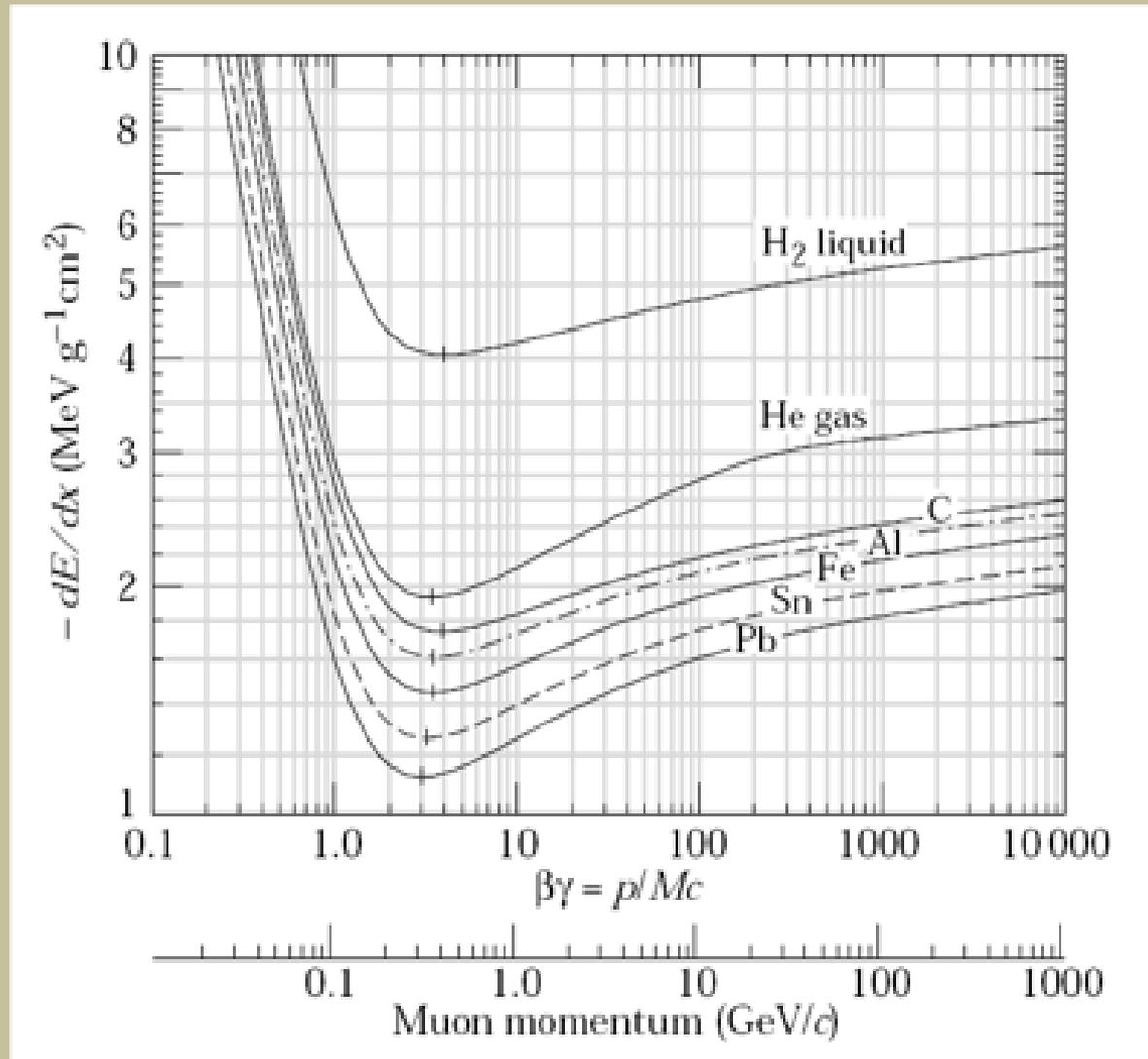
## Interação com os electrões atómicos:

a partícula incidente transfere energia e os átomos sofrem excitação ou ionização.

## Interação com o núcleo:

- A partícula incidente é deflectida pelo campo eléctrico do núcleo, sofrendo dispersão elástica (multiple scattering).
- A partícula é acelerada e radia fotões de Bremsstrahlung (importante para partículas “leves”)

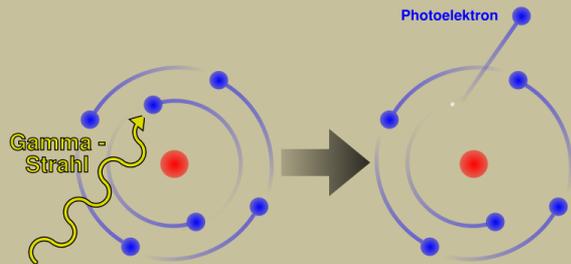
# Energy loss by ionization (charged particles)



# Interacção dos fótons com a matéria

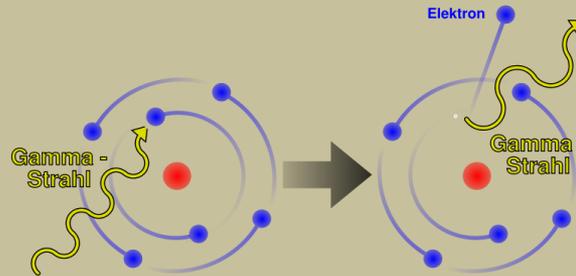
Os fótons interagem com a matéria, produzindo partículas carregadas, através dos seguintes processos: **Efeito fotoeléctrico, Dispersão de Compton, Produção de pares**

## Efeito fotoeléctrico



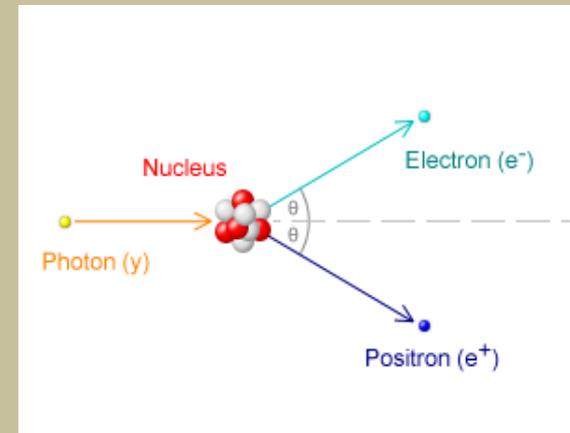
Fotão é absorvido por um átomo ejectando um electrão.

## Dispersão de Compton



Fotão choca com um electrão quase livre do átomo, ejectando-o.

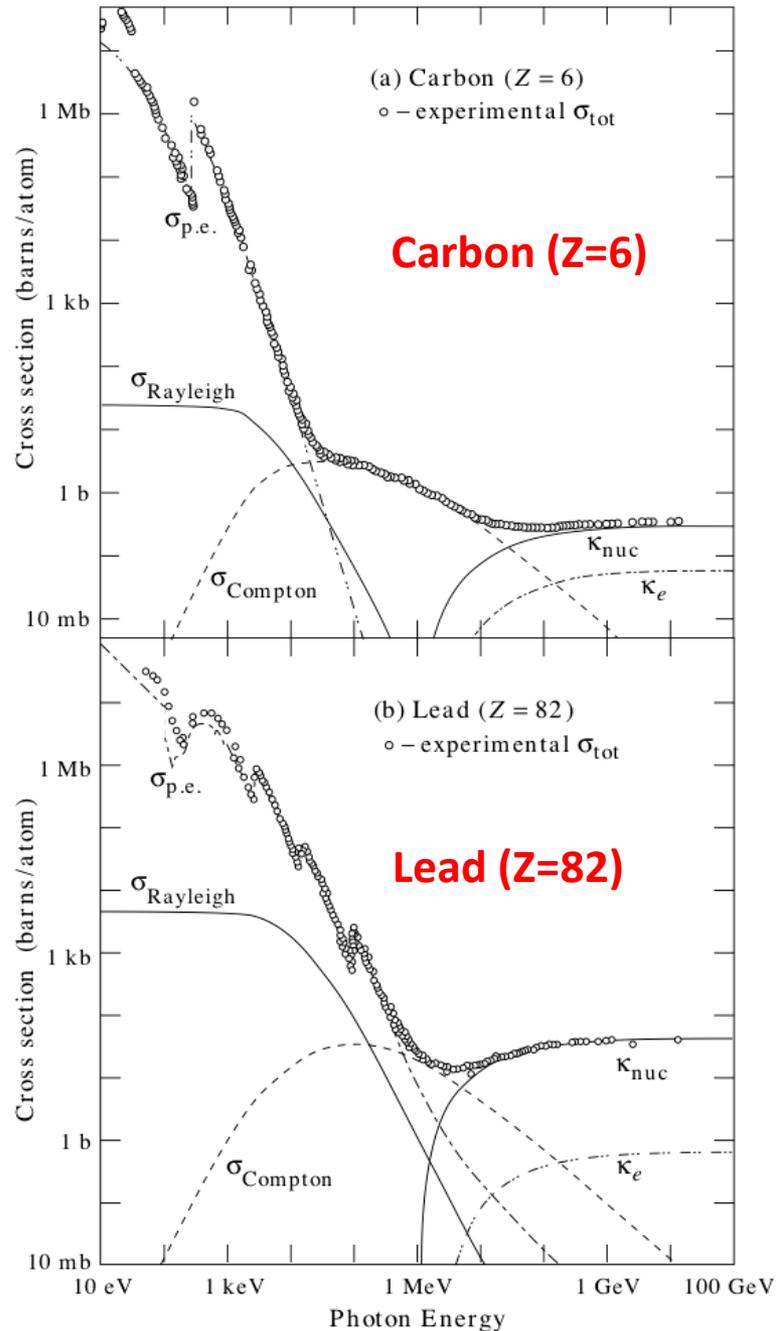
## Produção de pares



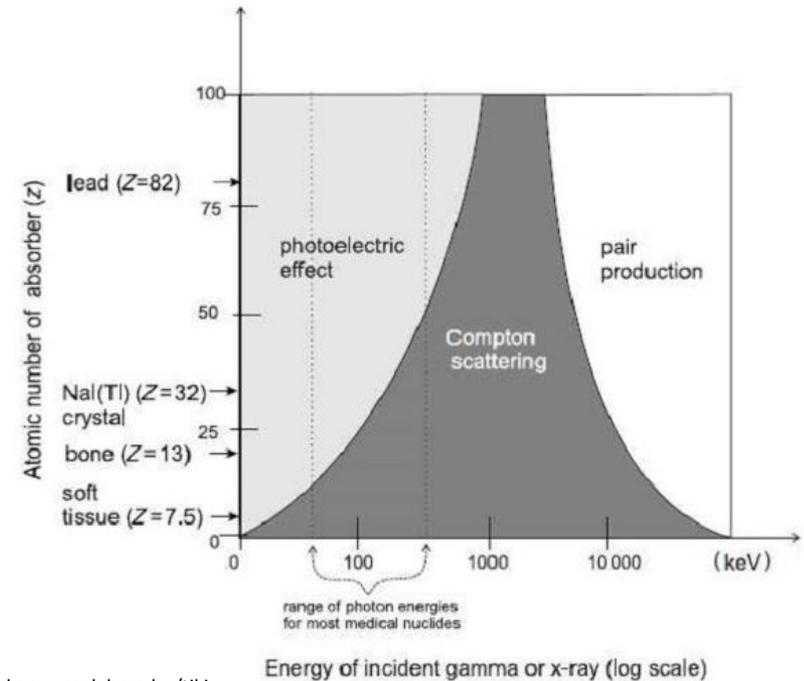
Fotão converte-se num par electrão-positrão.

$$E_{\gamma} \geq 2m_e c^2 \quad (= 1.022 \text{ MeV})$$

# Photon interactions



- $\sigma_{p.e.}$  photo electric effect
- $\sigma_{\text{Rayleigh}}$  Coherent scattering (Rayleigh scattering —atom neither ionized nor excited)
- $\sigma_{\text{Compton}}$  Incoherent scattering (Compton scattering off an electron)
- $\kappa_{\text{nuc}}$  Pair production, nuclear field
- $\kappa_e$  Pair production, electron field



# Detectores

## Ionização

Detectores Gasosos  
e emulsões

Estado sólido:  
Silício, Germanio ...

## Excitação

Cintiladores:  
cristais e plásticos

# Detectores de Ionização

## Detectores gasosos:

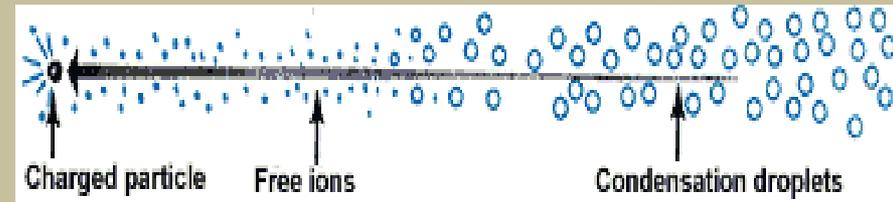
As partículas carregadas deixam um rasto de pares electrão-ião em gases ou líquidos.

I) A ionização pode induzir reacções que permitem a visualizar a trajectória da partícula

**Câmara de nevoeiro:** a carga cria gotículas

**Câmara de bolhas:** a carga cria bolhas

**Emulsão fotográfica:** a carga impressiona o filme



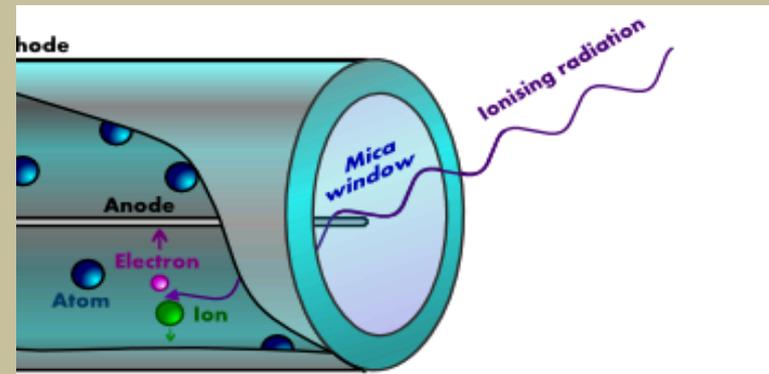
II) Aplicando um campo eléctrico ao volume de detecção, estas cargas podem ser recolhidas e lidas por electrónica adequada. As cargas podem ser internamente amplificadas para produzirem um sinal mensurável. Os vários tipos de detectores são basicamente um só dispositivo que pode trabalhar em diversos regimes e configurações :

**Câmaras de ionização**

**Contador proporcional**

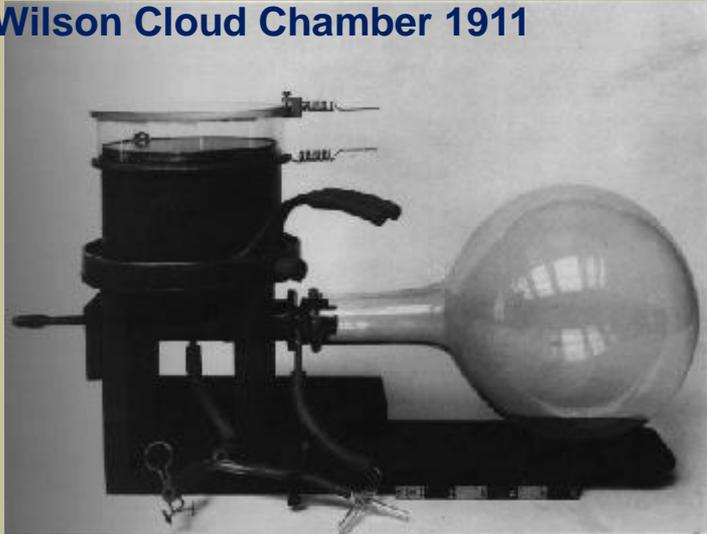
**Contador Geiger-Müller**

**Câmaras de fios, ...**



# Cloud chambers

Wilson Cloud Chamber 1911



Cosmic Ray Interactions in a Cloud Chamber



(Pic du Midi, 2877 m altitude)

Positron discovery - Carl Anderson (1932)

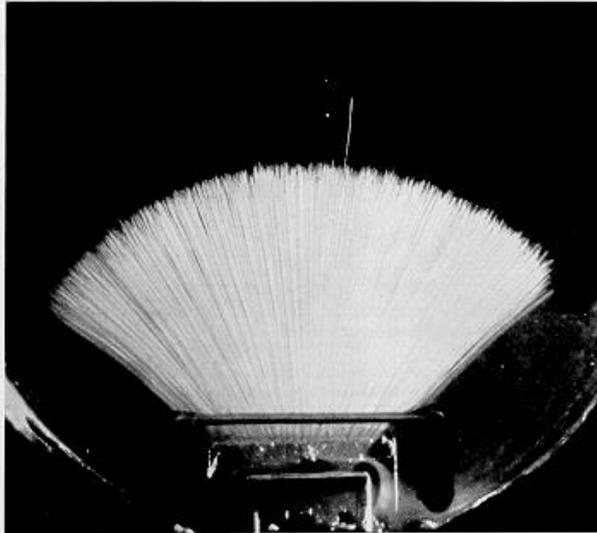
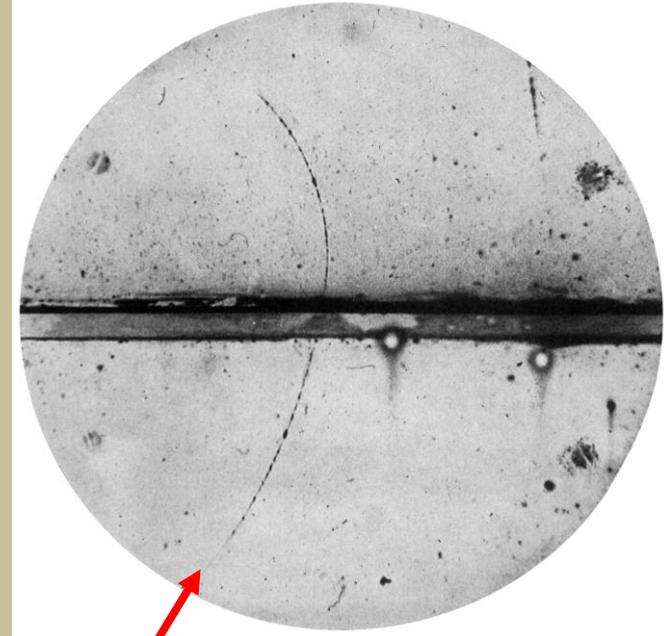


Fig. 13 K. PHILIPP, *Naturwissenschaften*, 14, 1203 (1926).

Alphas, Philipp 1926



# Câmara de nevoeiro



Um electrão com uma energia inicial de 16.9 MeV move-se em espiral num campo magnético, sendo visíveis 36 voltas.

O percurso total é de 1030 cm, e a energia final 12.4 MeV.

No entanto, a perda de energia prevista por ionização é de 2.8MeV.

A perda de energia observada (4.5MeV) é pois parcialmente devida a Bremsstrahlung.

**Electrão energético movendo-se num  
Campo magnético (Bevatron, 1940)**

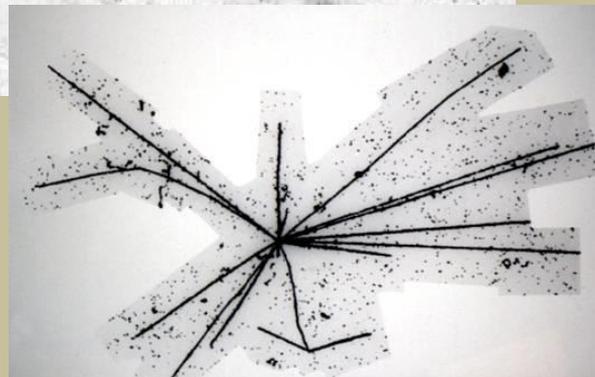
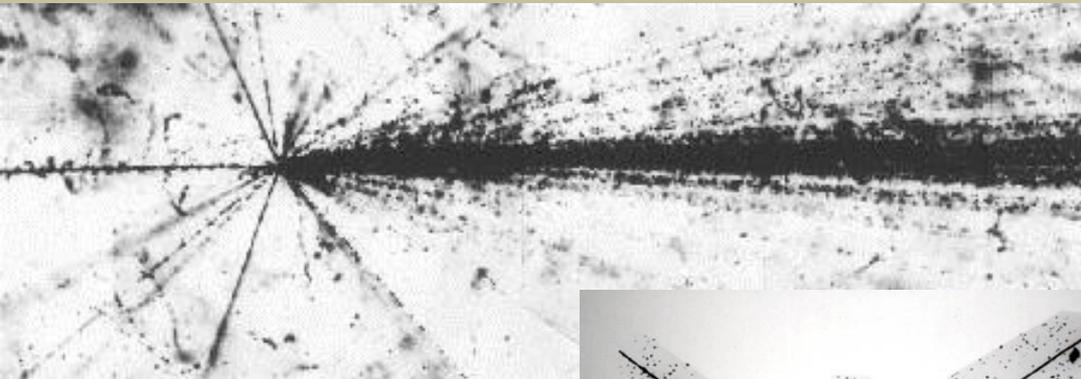
# Emulsões Fotográficas

Em emulsões fotográficas a ionização induz reacções químicas que permitem visualizar a trajectória da partícula

Entre 1923 e 1938 Marietta Blau foi pioneira nesta técnica.

As emulsões eram expostas aos raios cósmicos a altitudes elevadas durante longos períodos e depois analisadas ao microscópio

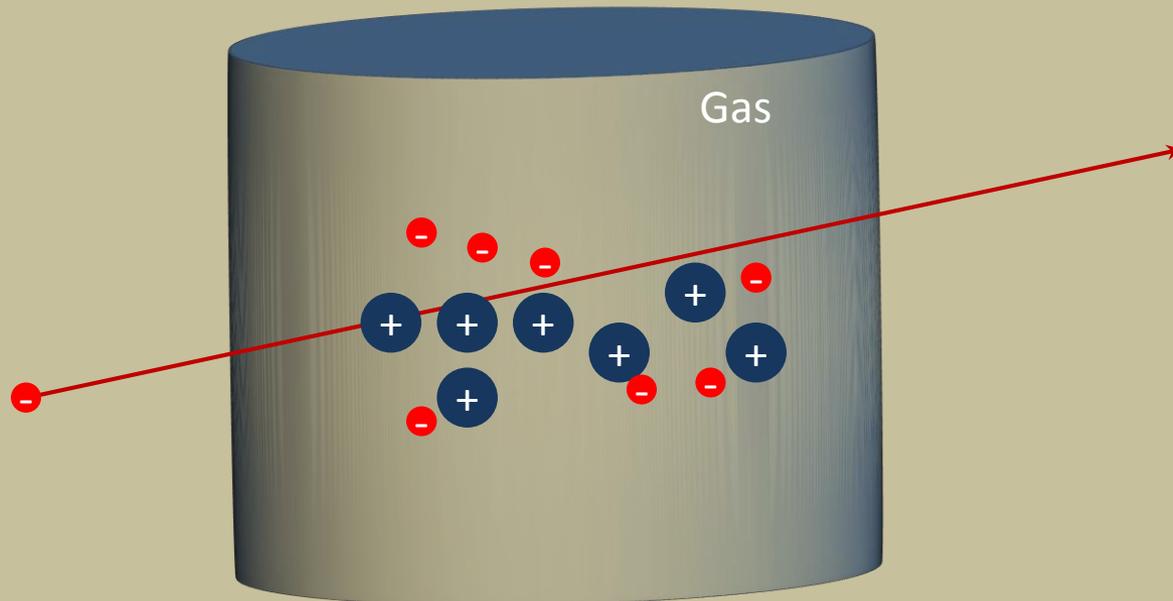
A alta densidade das emulsões comparada com a das câmaras de nevoeiro tornava mais visíveis as trajectórias de partículas resultantes de desintegrações



# Câmaras de ionização

## Princípio de funcionamento:

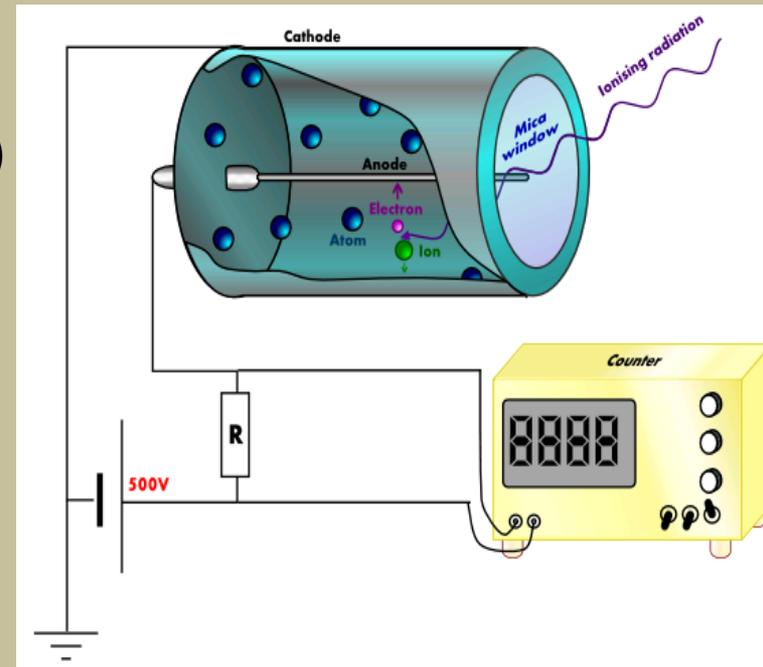
1. O gás é ionizado pelas partículas carregadas que o atravessam
2. Formam-se pares electrão-ião
3. Se fôr aplicado um campo eléctrico, pode colectar-se a carga eléctrica



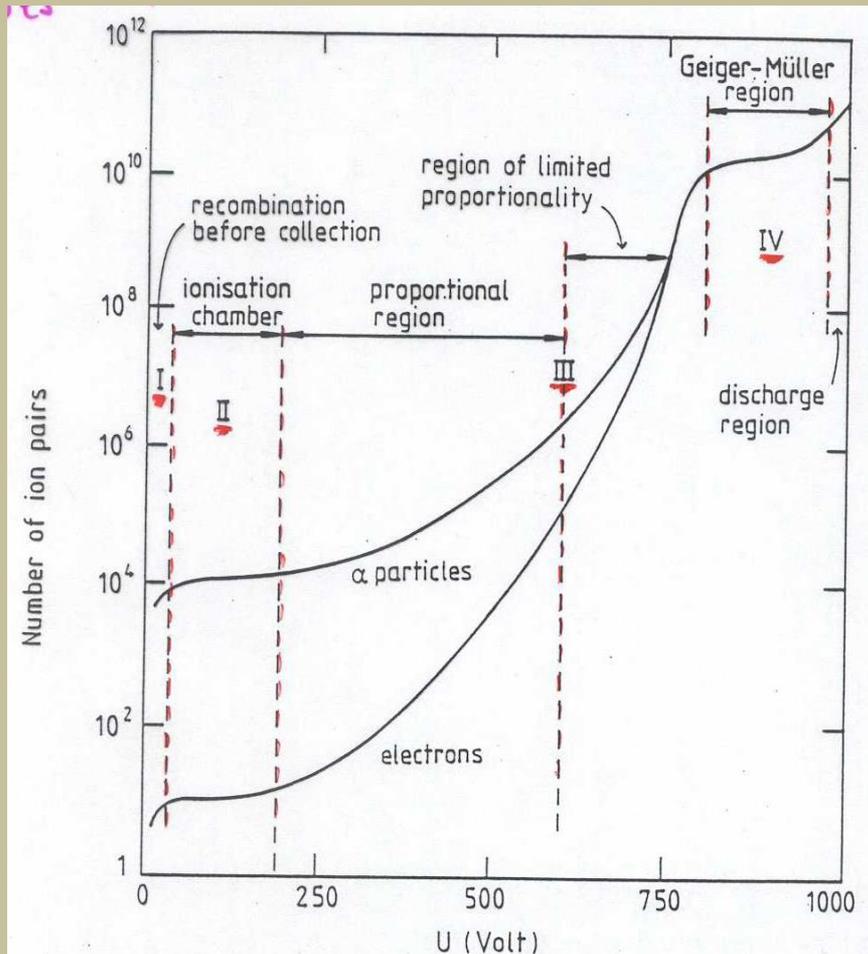
# Camaras de Ionização

Os diferentes detectores de ionização são basicamente um só dispositivo que pode trabalhar em diversos regimes de tensão aplicada e com diversas configurações geométricas, explorando diferentes fenómenos.

- Cátodo: cilindro de paredes condutoras cheio de um gás nobre
- Ânodo: fio condutor ao longo do eixo do cilindro ( $+V_0$ )
- Campo eléctrico: radial  $E(r) = 1/r \cdot V_0 / \ln(r_{\text{ext}}/r_{\text{int}})$
- Quando uma partícula atravessa o cilindro são criados pares electrão-ião em número proporcional à quantidade de energia depositada
- Devido ao campo eléctrico, os iões são acelerados para o cátodo e os electrões para o ânodo, onde se convertem num impulso de corrente, que por integração dá a carga recolhida.
- A carga recolhida depende de  $V_0$



# Camaras de ionização



- **Região I** – se  $V_0 \sim 0$ , os pares e<sup>-</sup> vão recombinam-se. **Não há carga recolhida.**

- **Região II – Câmara de ionização**

A partir de certo valor de  $V_0$  todos os pares são recolhidos e um aumento de  $V_0$  não tem efeito: **primeiro patamar.**

- **Região III – Contador proporcional**

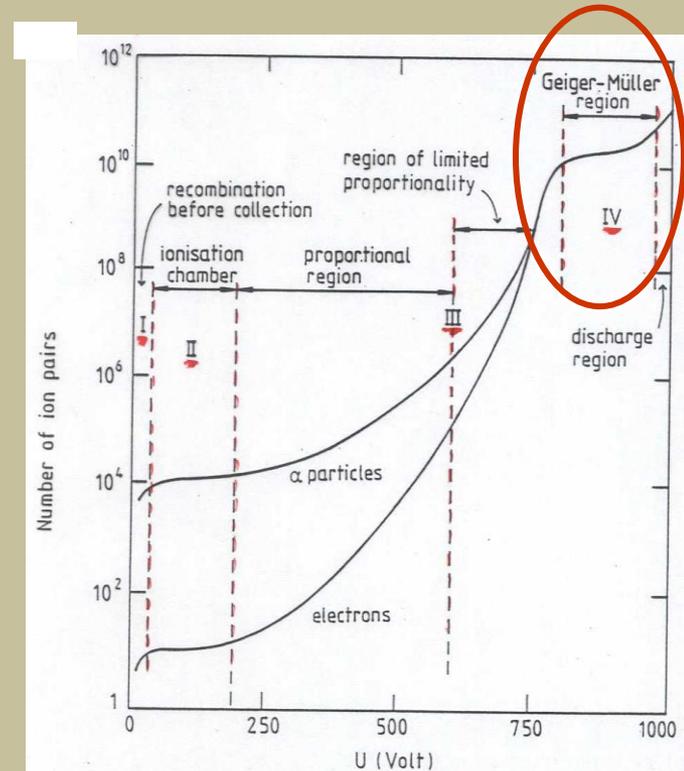
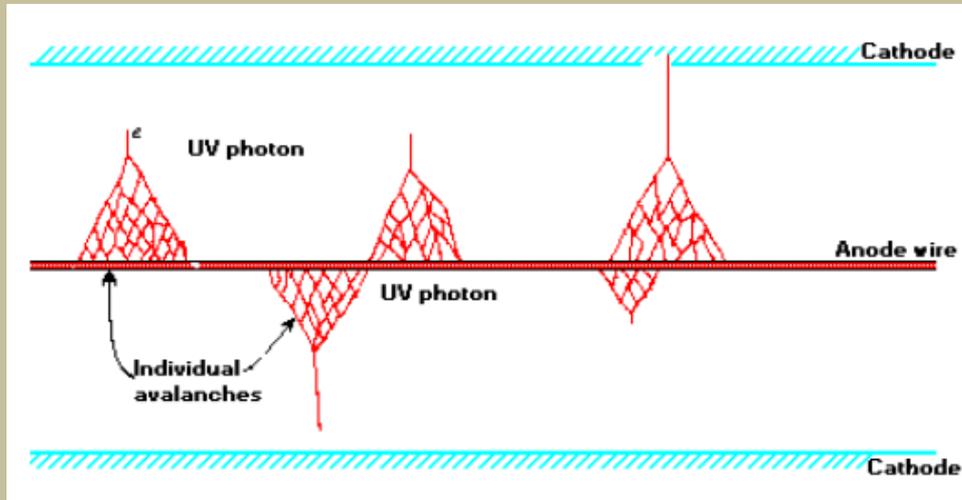
Continuando a aumentar  $V_0$ , os electrões libertados têm energia suficiente para produzir **ionizações secundárias**

→ **Ionização em avalanche** (junto ao ânodo)

- **Região IV – Contador Geiger-Müller**

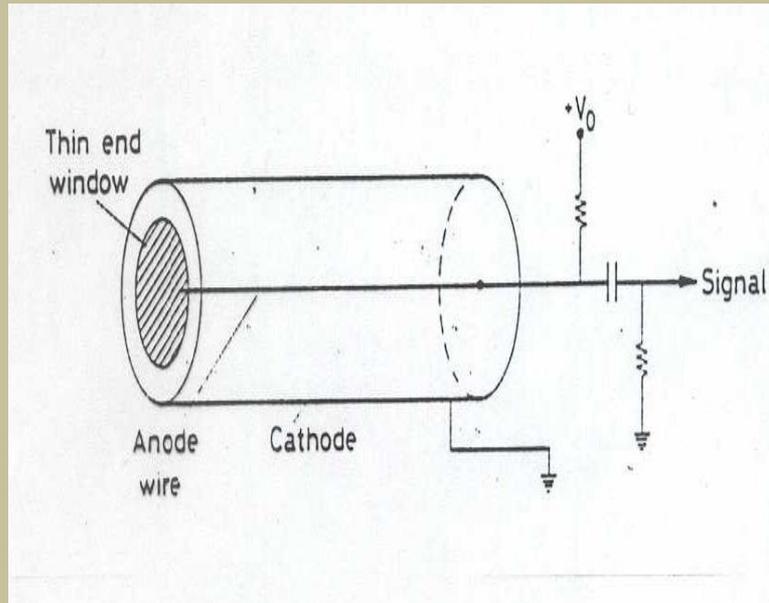
Aumentando  $V_0$  ocorre uma **descarga no gás**: avalanches provocadas por fótons de desexcitação moleculares. O sinal em corrente satura - **patamar**

# Contador Geiger-Müller



- 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);
- Tempo de recuperação relativamente alto -- “dead-time”;
- Apenas permite medir taxas de contagem da ordem de  $10^2$  Hz;

# Geiger-Müller counters



## Pancake and Mica End Window GM Detectors

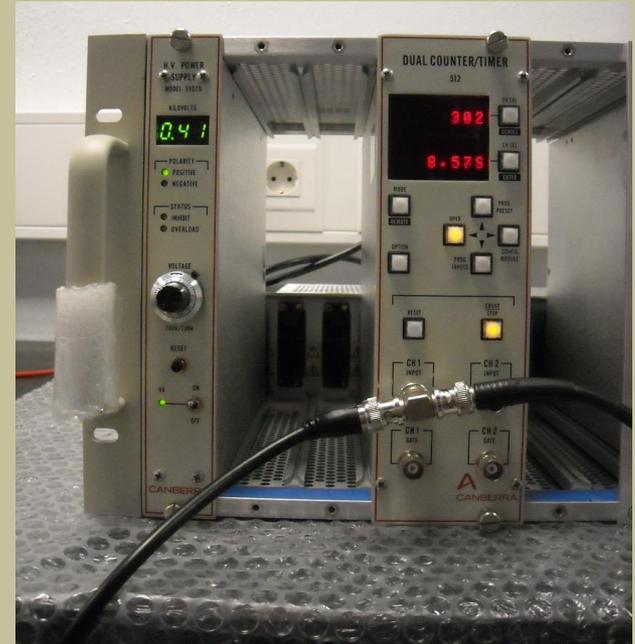


Main characteristics :

Simple and relatively inexpensive system;

Large collected charge  $\rightarrow$  large output signal ( $\sim$  volt)  $\rightarrow$  simplified associated electronics

# Lab activity : Geiger-Müller counter

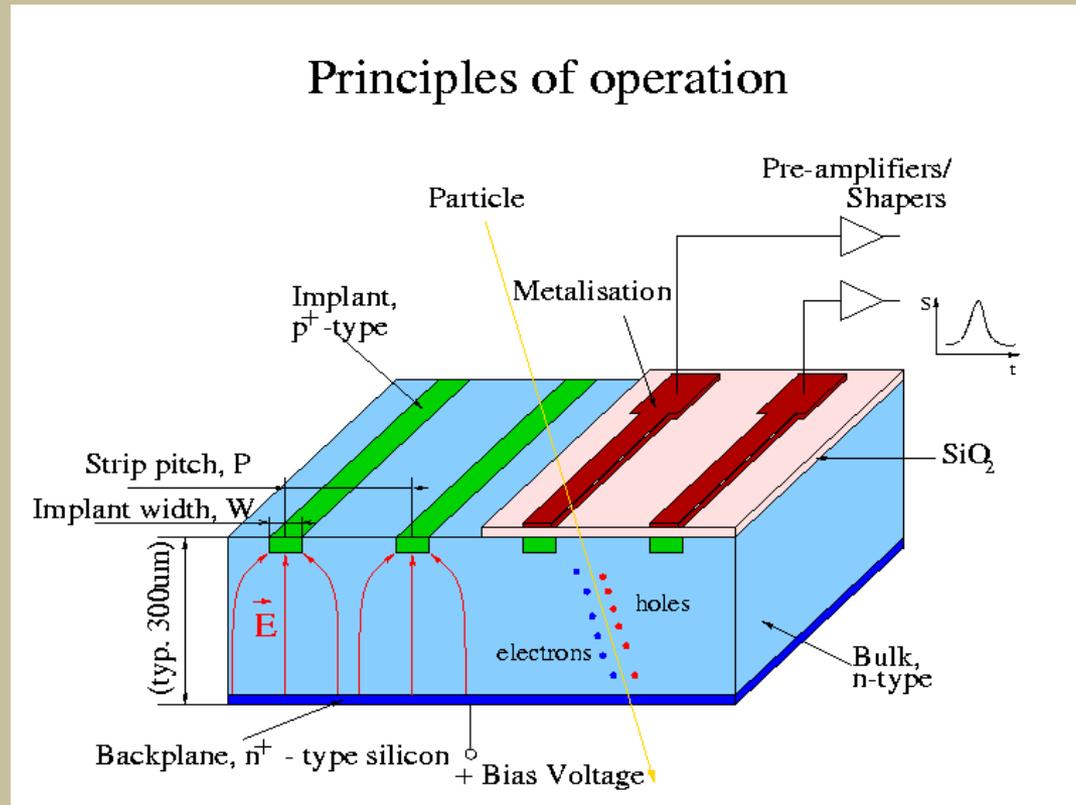


1. Study the variation of the count rate vs high voltage → Geiger plateau;
2. Study the GM efficiency for  $\gamma$  and  $\beta$  radiation.
3. Study the count rate vs distance of radioactive source to GM

# Estado sólido

## Princípio de funcionamento:

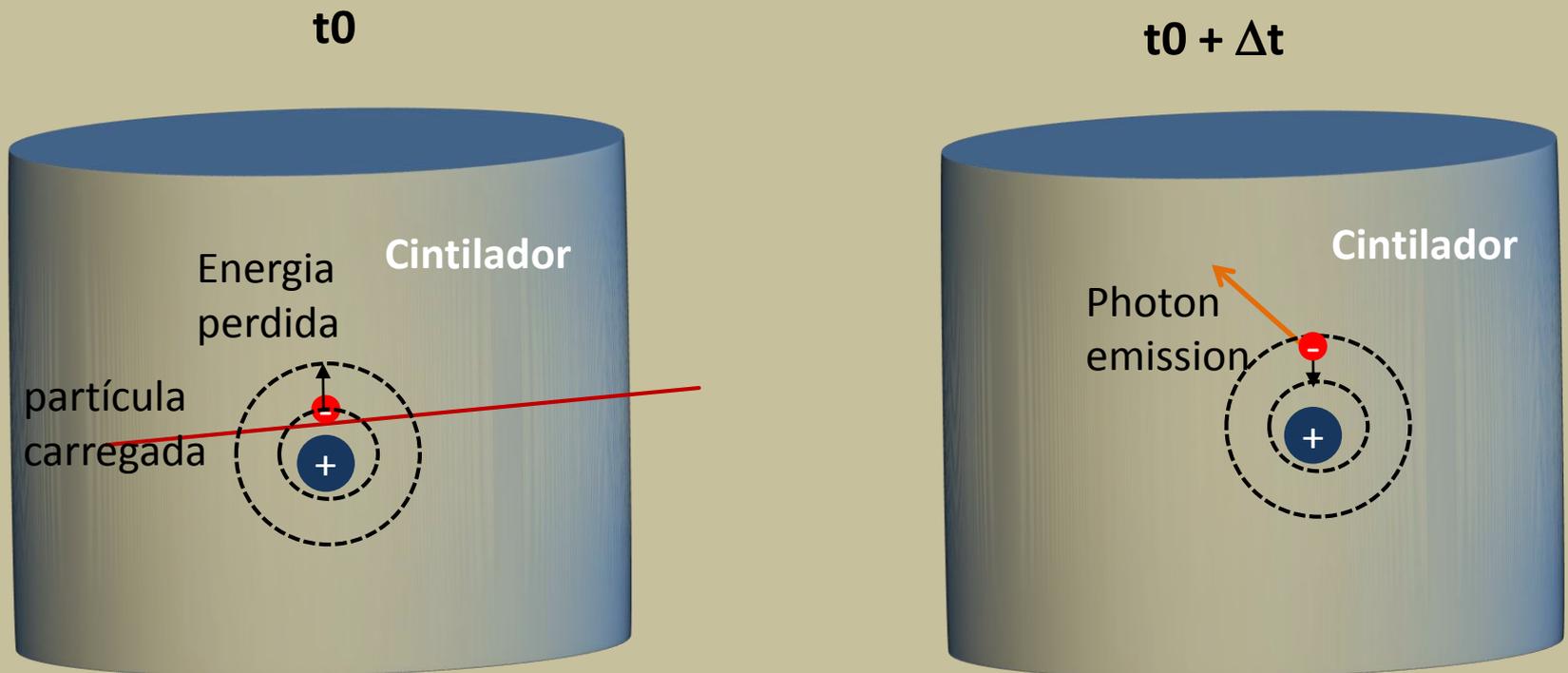
As partículas carregadas deixam um rasto de pares electrão-lacuna. As cargas em movimento podem ser recolhidas e lidas por electrónica adequada. Neste detectores o sinal induzido pela carga inicial é suficiente, não sendo necessária amplificação.



# Cintiladores

## Princípio de funcionamento:

A energia perdida pelas partículas incidentes vai excitar os átomos do material. Há emissão de luz na gama do visível ou ultravioleta (UV).



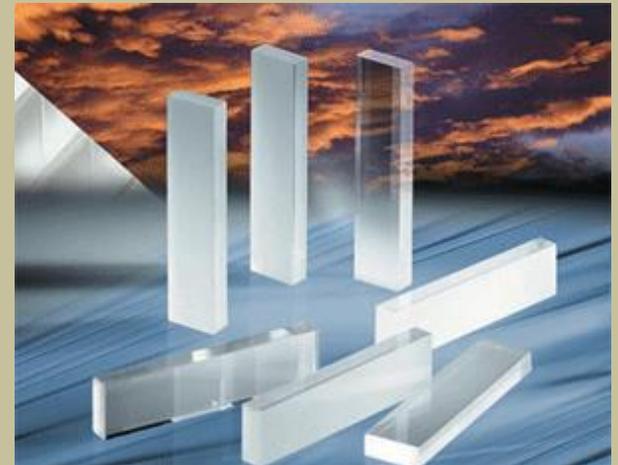
# Cintiladores

- **Fluorescência:** reemissão rápida de luz  
(podendo ter uma componente mais rápida e outra mais lenta)
- **Fosforescência:** reemissão lenta de luz

## Caracterização:

- Eficiência de conversão da energia depositada em luz (Light yield)
- Tempo de emissão (componente rápida)
- Espectro de emissão
- Transparência

Variedade / versatilidade → inúmeras aplicações



# Cintiladores

## Cintiladores Orgânicos

Materiais de **baixo Z**:  
**plásticos** (e.g. poliestireno) dopados  
com moléculas fluorescentes

Cintilação de natureza molecular

### Baixo Light Yield

Emissão de luz **rápida** (1- 3 ns)

Bons para **electrões**

## Cintiladores Inorgânicos

**Grande densidade e Z**:  
**cristais** NaI, CsI, BGO, ...  
dopados com impurezas activadoras:  
NaI(Tl)

Cintilação devida à estrutura de bandas  
electrónicas dos cristais

### Elevado Light Yield

Emissão de luz **lenta** (~100 ns)

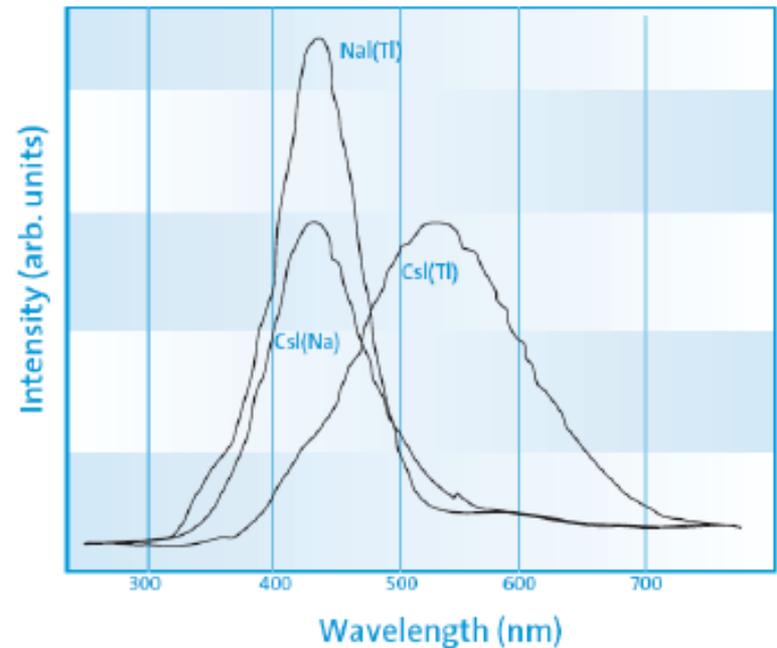
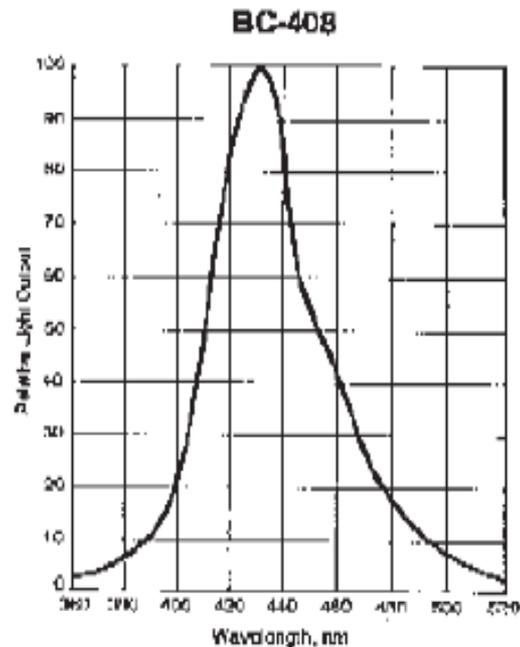
Bons para **fotões**

Usados em medicina nuclear

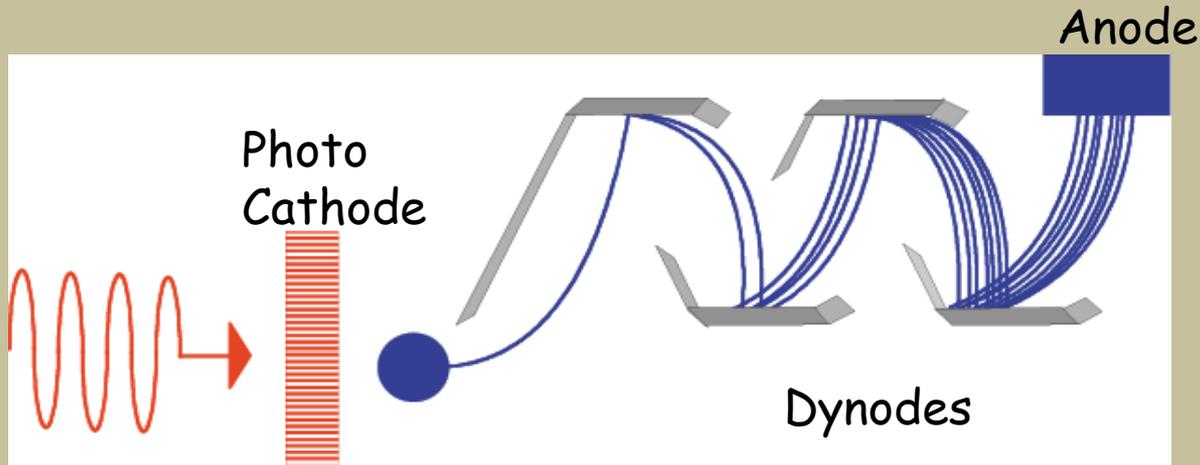
Outros tipos: gases (nobres!), vidros, ...

# Cintiladores

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

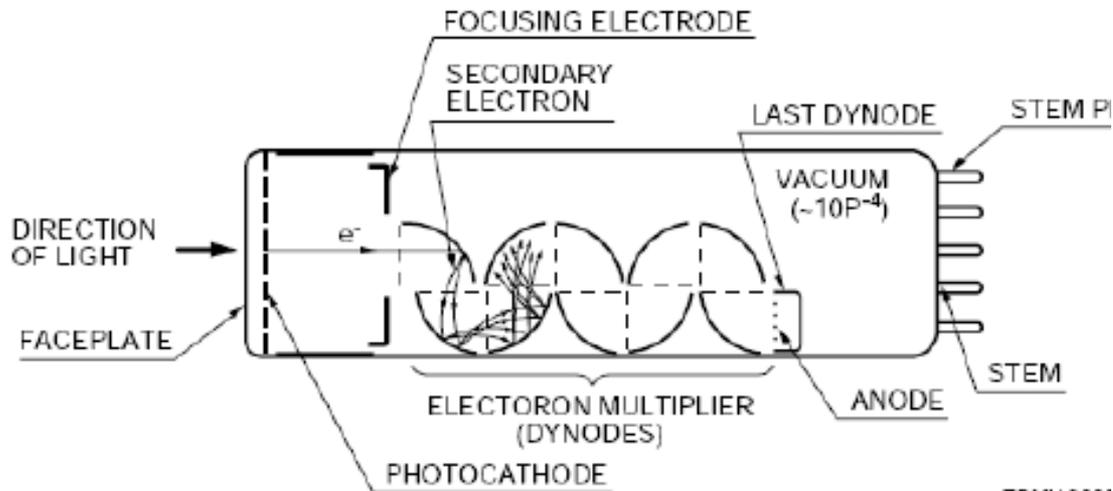


# Fotomultiplicadores

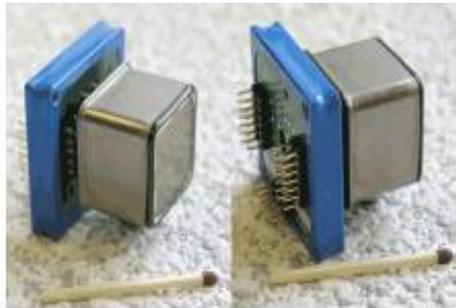


- **Janela** de entrada transparente (vidro ou quartzo)
- **Fotocátodo:**  
fotões incidentes são convertidos em electrões (fotoelectrões) por efeito fotoelétrico  
Eficiência quântica =  $N_{pe}/N_g \sim 20\%$   
Baixo ruído = Corrente negra (emissão espontânea) + ruído estatístico
- **Dínodos:** cadeia de amplificação: sujeitos a tensão, emissão de electrões secundários  
Ganho  $\approx 10^6$  . Muito rápidos  $\approx 200$  ps

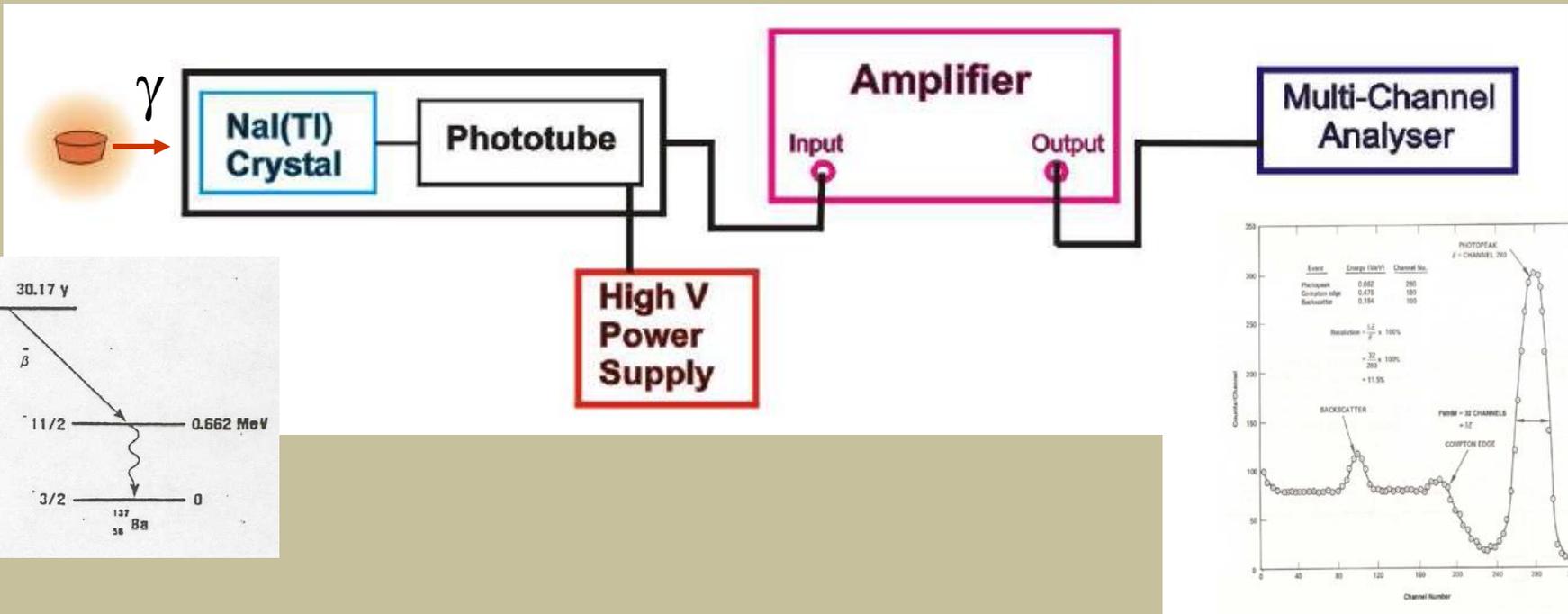
# Fotomultiplicadores



TPMH00X



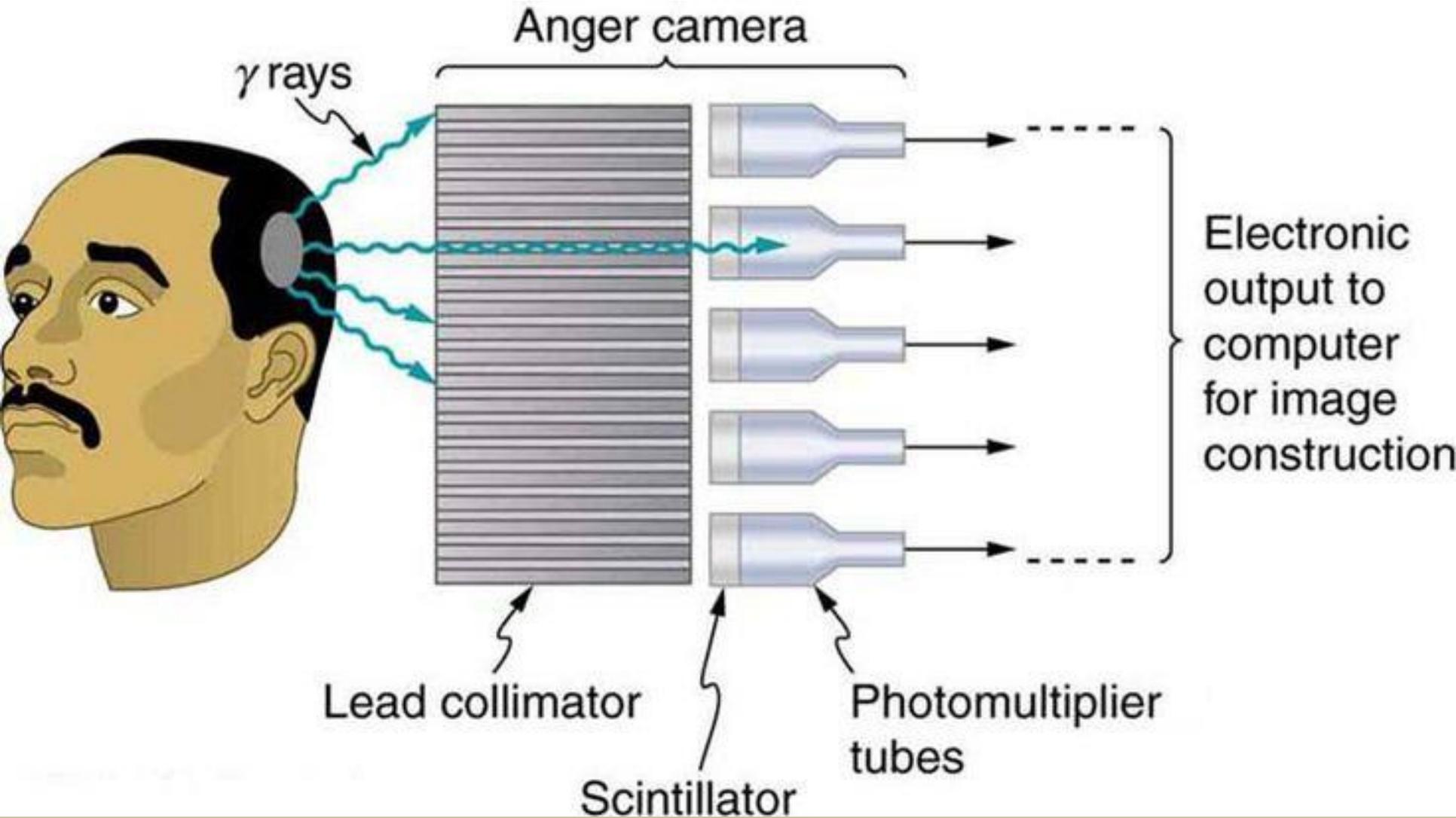
# Espectroscopia gama



O fóton incidente origina partículas carregadas no cristal, que vão produzir luz de cintilação

Os fótons de cintilação atingem o fotocátodo do PMT. São produzidos fotoelectrões, que se multiplicam na cadeia de amplificação

# Gamma camera (Anger camera)

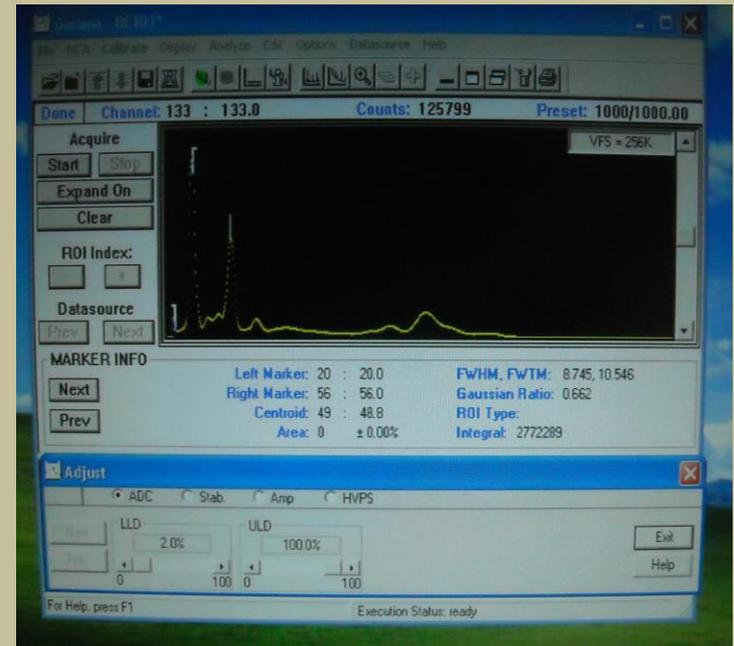
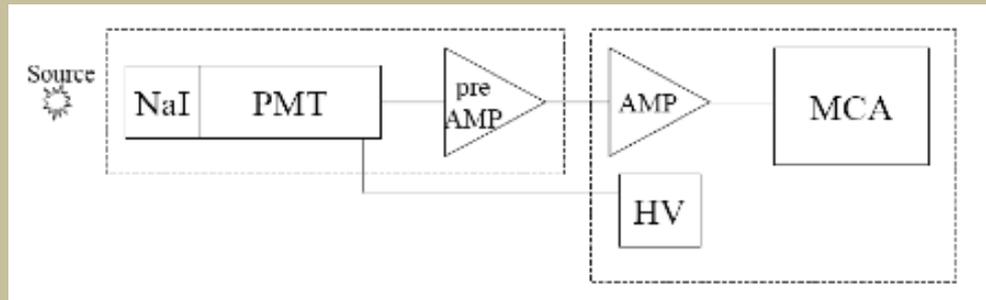


# Gamma camera head



Hexagonal photomultipliers  
(compact arrangement)

# Lab activity : Gamma spectroscopy



1. Characterization of a simple setup for gamma spectroscopy;
2. Study the spectrum of several radioactive sources;
3. Measure the kinematics of gamma interaction processes;
4. Measure the absorption length of lead;