



# Detetores de Neutrons

---

***Marcelo G Munhoz***

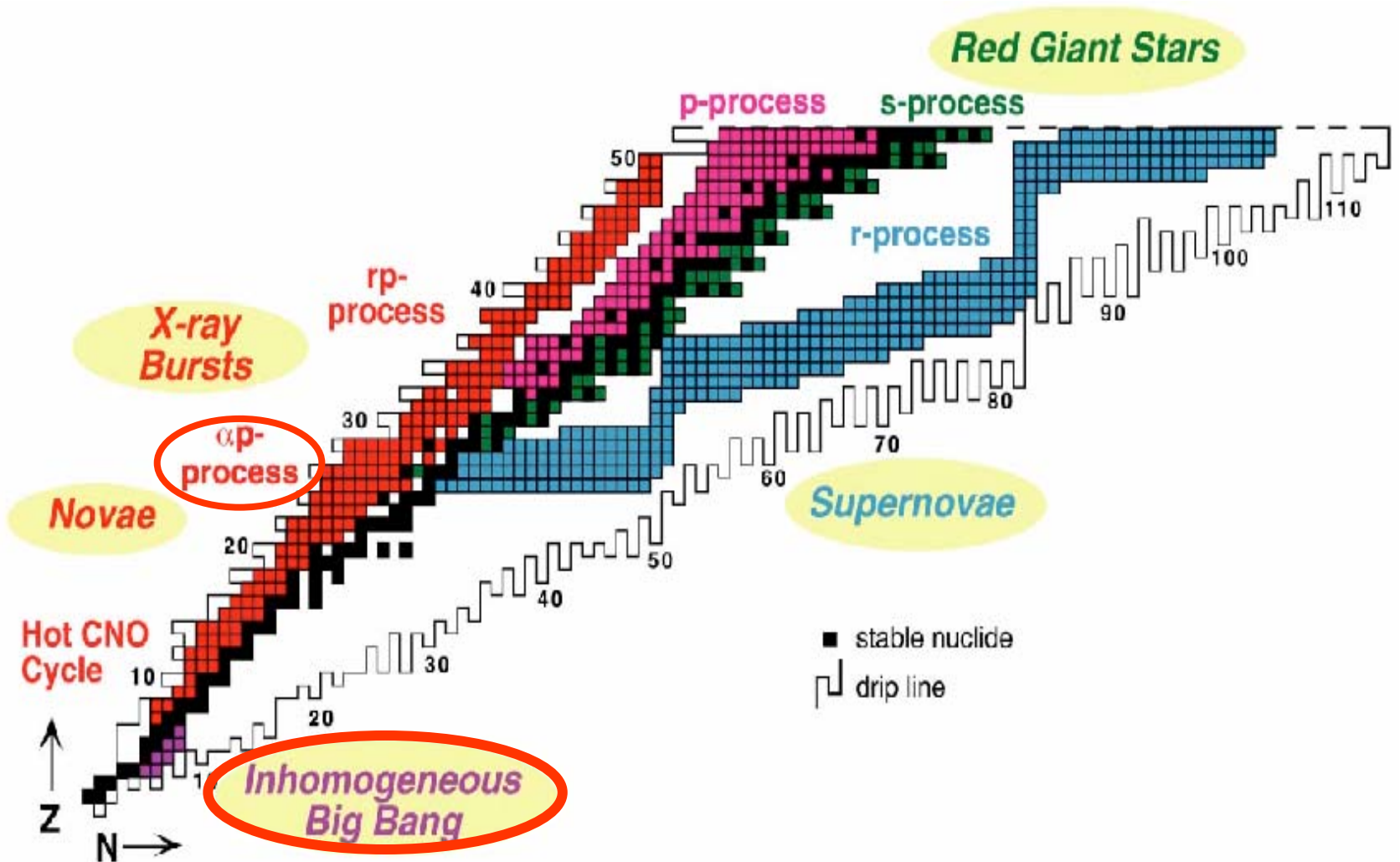
XIII Escola de Verão "Jorge André Swieca"  
de Física Nuclear Experimental

# Apresentação

---

- Por que detetar neutrons? –  
Motivação
- Como detetar neutrons? –  
Processos Físicos e Instrumentação  
envolvidos
- A Parede de neutrons do  
Laboratório Pelletron-Linac
- Atividades na Escola de Verão  
envolvendo o detetor

# Núcleos Instáveis na Astrofísica

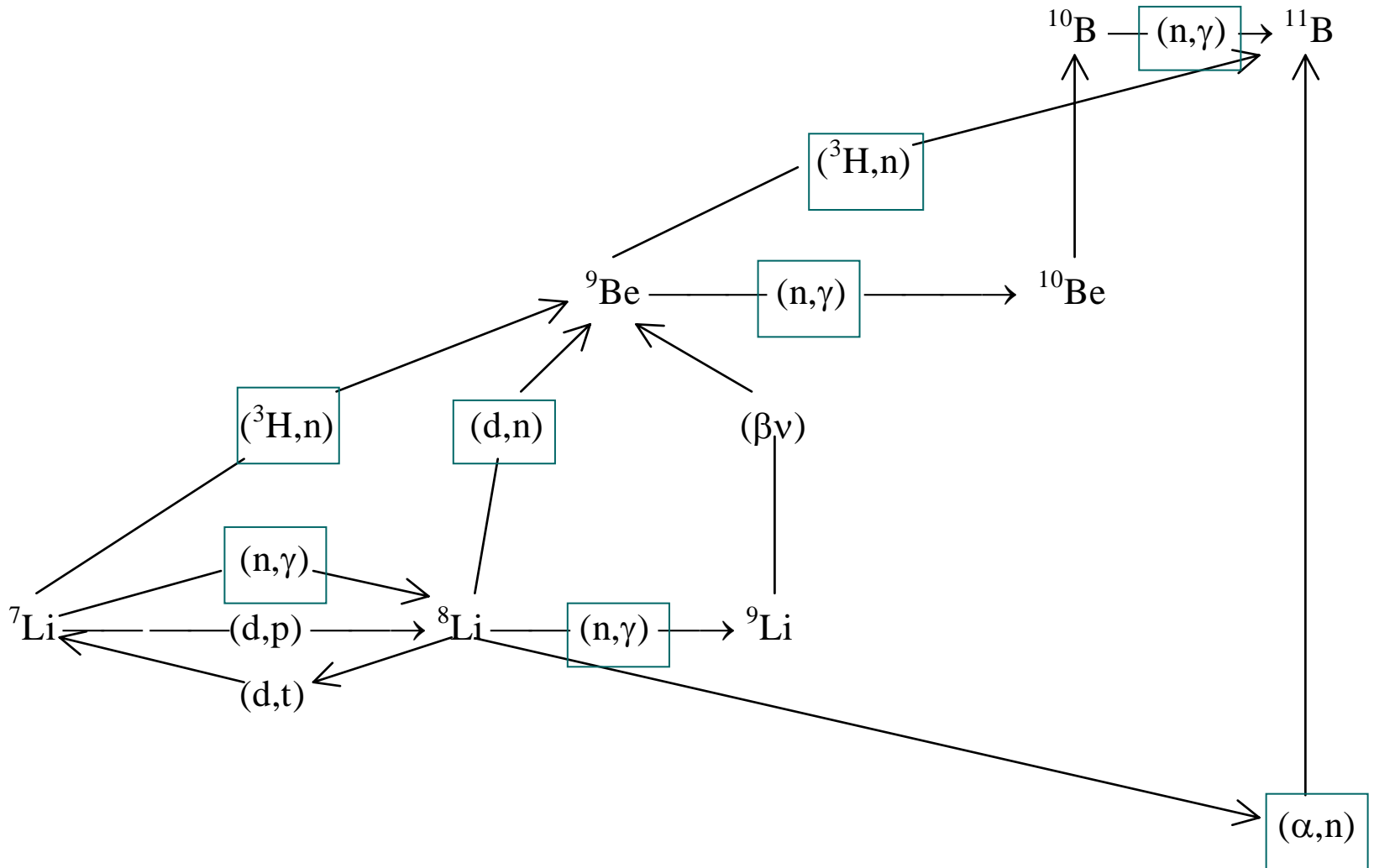


# Big-Bang não-homogêneo

---

- O Universo primordial não seria homogêneo, como no modelo padrão do Big-Bang;
- Este modelo prevê a ocorrência de reações envolvendo núcleos pesados-leves instáveis (como  ${}^8,{}^9\text{Li}$ ) durante a nucleossíntese primordial, diferenciando-o do modelo padrão da Big-Bang.

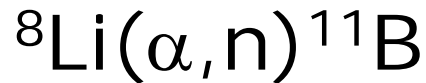
# Nucleossíntese Primordial?



# Big-Bang não-homogêneo

---

- Reações de interesse:



- Paradellis *et. al.* 1990; Boyd *et. al.* 1992; Gu *et. al.* 1995;



- Balbes *et. al.* 1993, 1995; Becchetti *et. al.* 1989, 1992, 1993; Caussyn *et. al.*, 1993.

# Big-Bang não-homogêneo: Reações de Captura de Nêutrons ( $n,\gamma$ )

---

- Como medir? Reação inversa - Dissociação (quebra) Coulombiana
- Reações de interesse:
  - $7\text{Li}(n,\gamma)8\text{Li} \rightarrow 8\text{Li}(\gamma,n)7\text{Li}$ 
    - pode ser comparada às medidas realizadas com feixe de nêutrons (J.C. Blackmon, 1996);
  - $8\text{Li}(n,\gamma)9\text{Li} \rightarrow 9\text{Li}(\gamma,n)8\text{Li}$ 
    - Estudo de P.D. Zecher et. al. (1998) resultou em apenas limites superiores da seção de choque dessa reação para  $E_n=0-500$  keV.

# Processos- $\alpha p$

---

○ Reações de interesse:





# Detetores de Nêutrons

---

Princípio básico de funcionamento:

- Conversão da energia do nêutron para uma partícula carregada

nêutron + núcleo alvo →  $\left\{ \begin{array}{l} \text{núcleo} \\ \text{de recuo} \\ \text{próton} \\ \text{partícula } \alpha \\ \text{fragmentos} \\ \text{de fissão} \end{array} \right.$

# Nêutrons Lentos × Nêutrons Rápidos

---

- Nêutrons Lentos (térmicos):
  - Energia abaixo de 0.5 eV
  - Presentes, principalmente, em reatores nucleares;
  - Devido a baixa energia do nêutron, toda energia das partículas carregadas vem do  $Q$  da reação;
  - Reações mais utilizadas:
    - $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ ,  $Q = 2.792 \text{ MeV}$
    - $^6\text{Li}(n,\alpha)$ ,  $Q = 4.78 \text{ MeV}$
    - $^3\text{He}(n,p)$ ,  $Q = 0.764 \text{ MeV}$

# Nêutrons Lentos × Nêutrons Rápidos

---

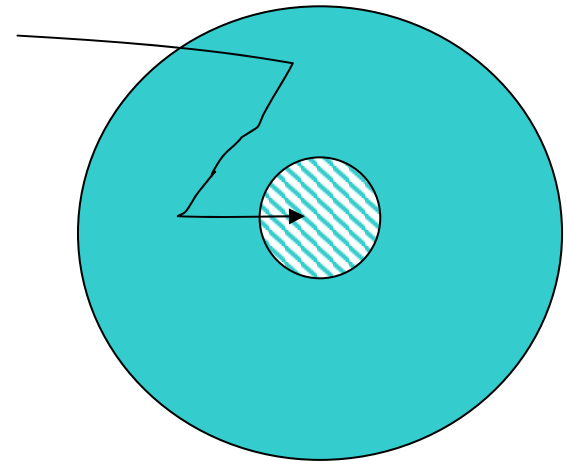
- Nêutrons Rápidos:
  - Mais energéticos ( $> 0.5 \text{ eV}$ );
  - Presentes nas reações estudadas no Pelletron;
  - É possível medir sua energia (para valores acima de 10 a 100  $\text{KeV}$ ).

# Deteção de Nêutrons Rápidos

---

## ○ Moderação:

- A velocidade dos nêutrons é diminuída (moderada) até ele se comportar como um nêutron lento, quando então é medido com um detetor de nêutrons térmicos;
- A energia do nêutron não pode ser medida com este tipo de detetor.



# Deteção de Nêutrons Rápidos

---

- Reações induzidas:
  - Utiliza-se certas reações nucleares ( $Q$  diferente de zero) para detetar os nêutrons;
  - Reações mais utilizadas:  
 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ ,  ${}^3\text{He}(n, p)$
  - Apesar de valores de  $Q$  diferente de zero, é possível medir a energia dos nêutrons;
  - Possuem seção de choque (probabilidade) menor de deteção que aqueles que usam de moderadores.

# Deteção de Nêutrons Rápidos

---

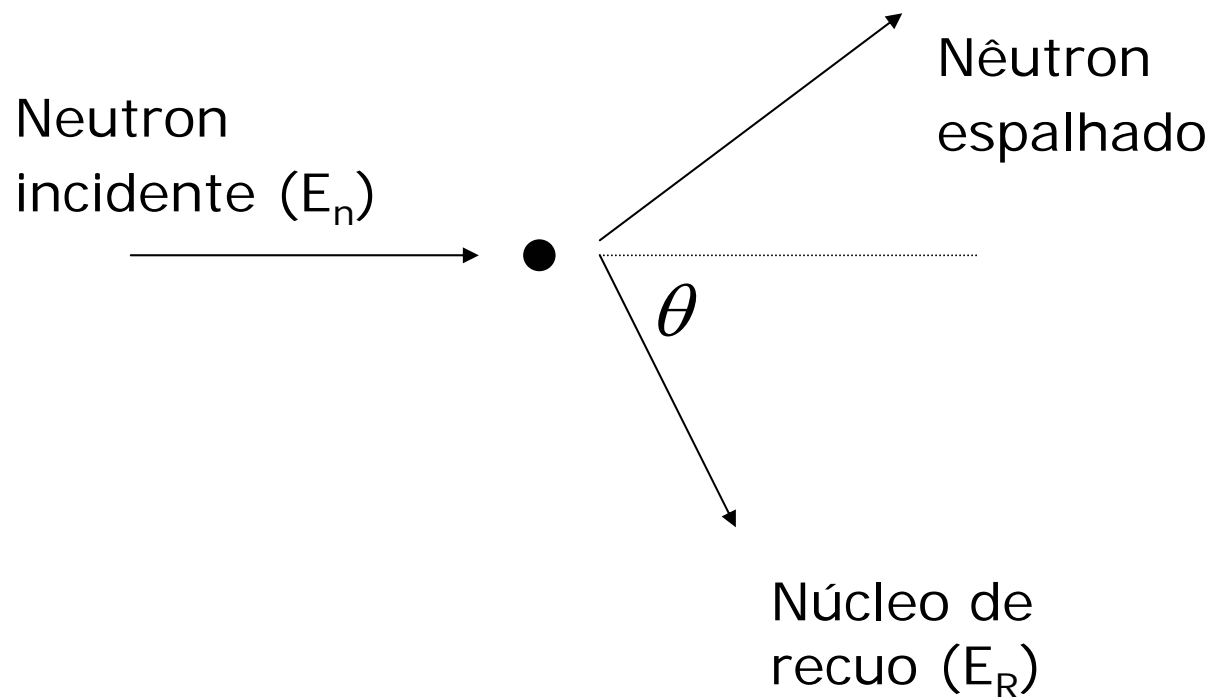
- Espalhamento:
  - Utiliza-se do espalhamento elástico de nêutrons ( $Q = 0$ ) para deteta-los;
  - Tipos de detetores de espalhamento:
    - Detetores a Gás;
    - Telescópios;
    - Cintiladores.
- No Pelletron-Linac: **detetor de espalhamento com cintilador**

# Deteção de Nêutrons Rápidos por Espalhamento

---

$$E_R = \frac{4A}{(1+A)^2} (\cos^2 \theta) \cdot E_n$$

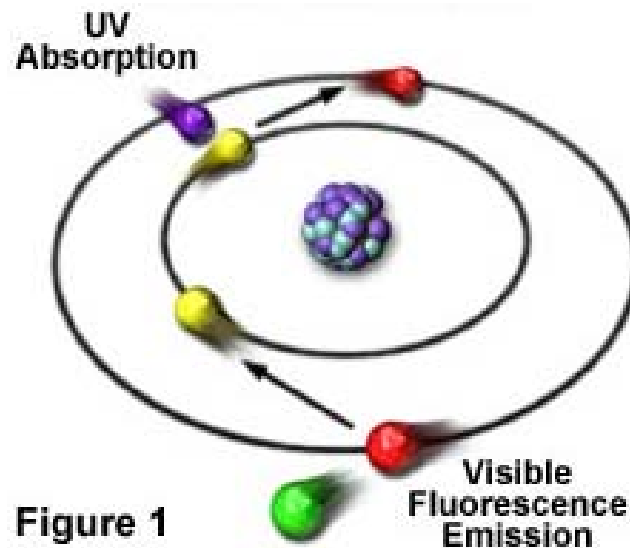
Portanto, se  $A=1$   
 $\rightarrow E_R = E_R^{\text{MAX}}$



# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

---

- Princípio de funcionamento:  
**luminescência** – absorção da energia e reemissão na forma de radiação visível

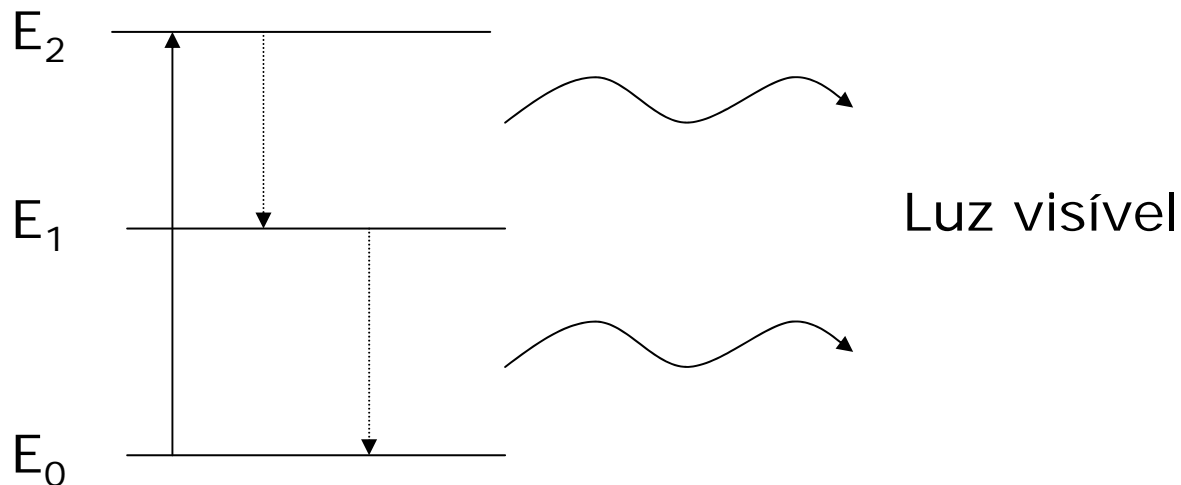




# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

---

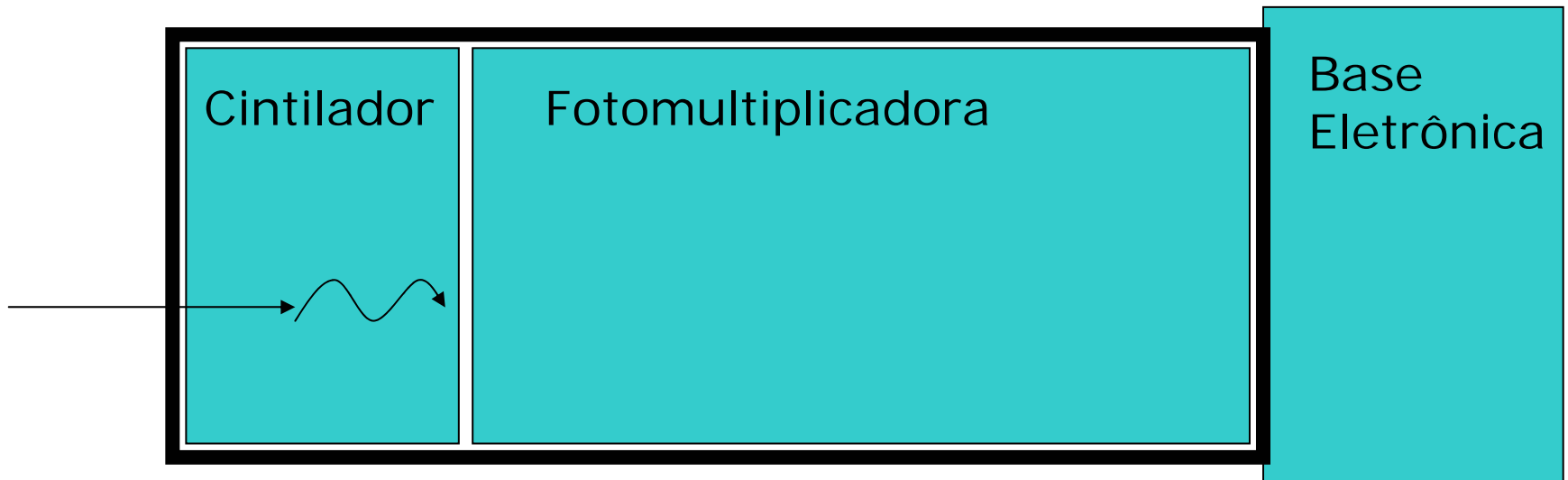
- Princípio de funcionamento:  
**luminescência** – absorção da energia e reemissão na forma de radiação visível



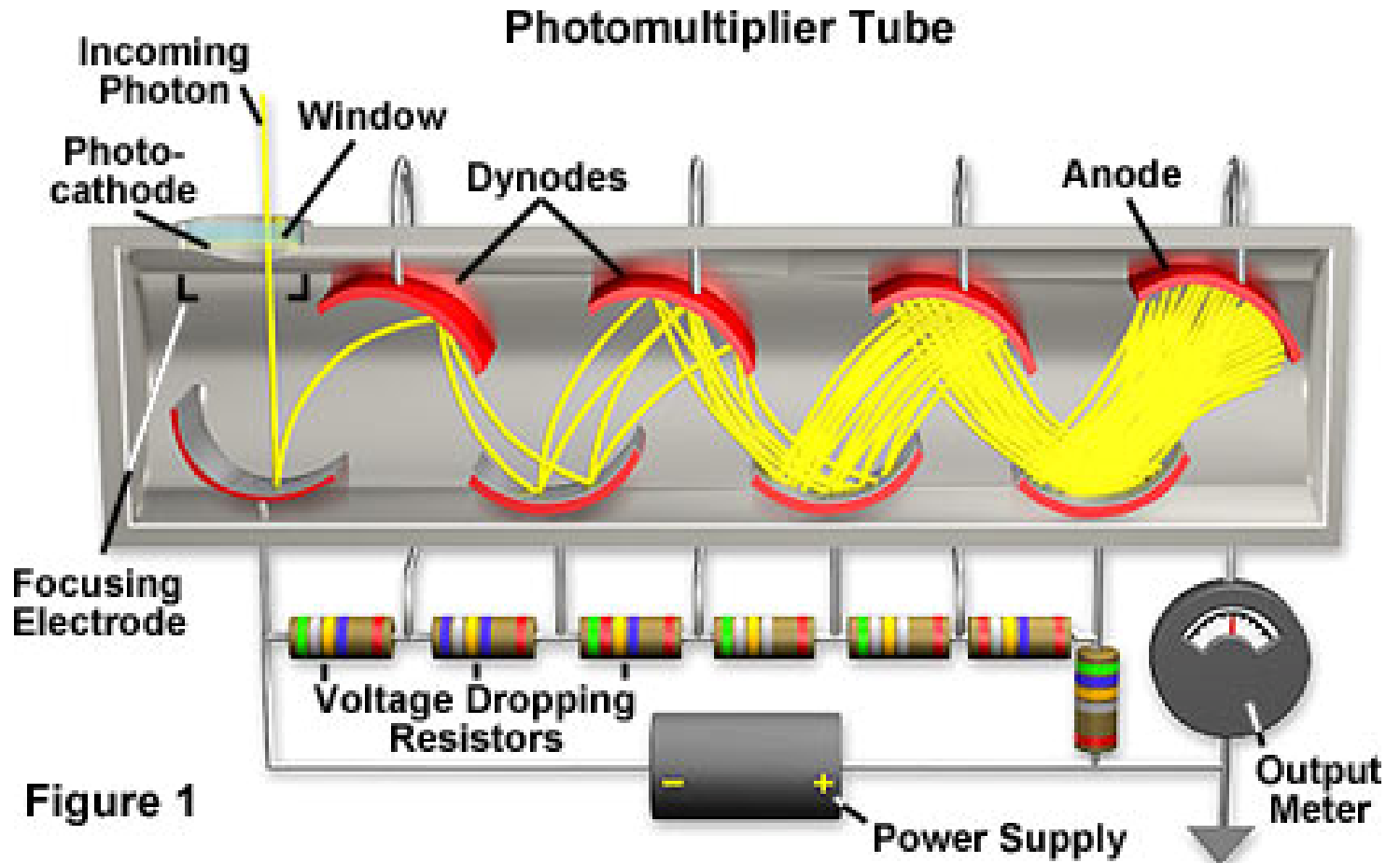
# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

---

- Elementos básicos:
  - Material cintilador
  - Fotomultiplicadora
  - Base eletrônica da fotomultiplicadora



# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos



# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

---

- Características desejadas de um detetor cintilador:
  - Alta eficiência na conversão da energia de excitação para radiação fluorescente;
  - Transparência do material cintilador para essa radiação;
  - Emissão espectral consistente com a sensibilidade da fotomultiplicadora;
  - Tempo de decaimento ( $\tau$ ) curto

# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

---

- Eficiência de detecção ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = 1 - \exp(-N \cdot \sigma \cdot d)$$

onde:

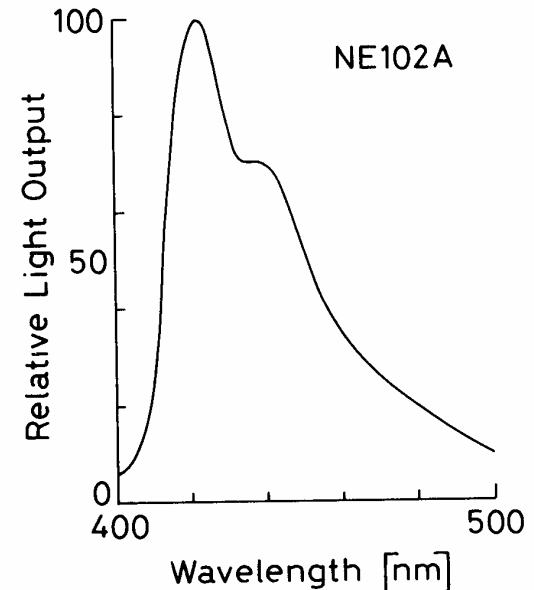
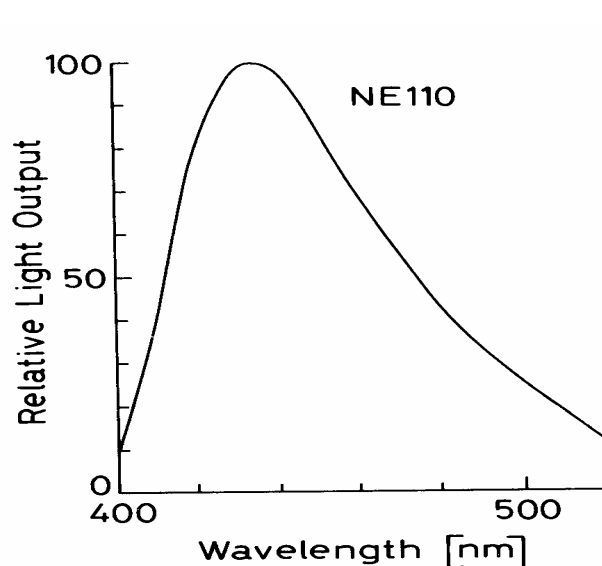
- $N$  é a densidade de núcleos espalhadores;
- $\sigma$  é a seção de choque de espalhamento do nêutron;
- $d$  é o caminho percorrido pelo nêutron no detetor.

# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

- Emissão Espectral:

Cada material emite radiação com características espectrais (frequências) diferentes.

É importante que essa emissão seja consistente com a sensibilidade da fotomultiplicadora



# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

---

- O processo de reemissão é descrito pela expressão:

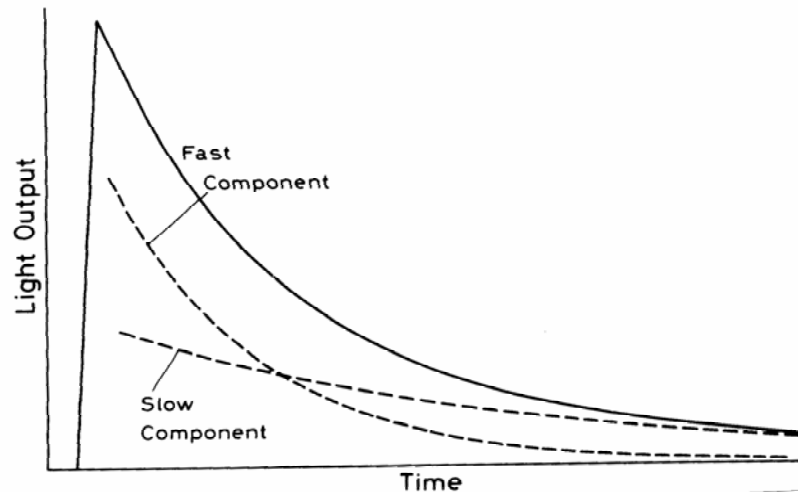
$$N = A \exp\left(\frac{-t}{\tau_f}\right) + B \exp\left(\frac{-t}{\tau_s}\right)$$

onde:  $N$  é o número de fótons emitidos no instante  $t$ ,  $\tau_f$  é a componente rápida de decaimento e  $\tau_s$  é a componente lenta de decaimento.

# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

---

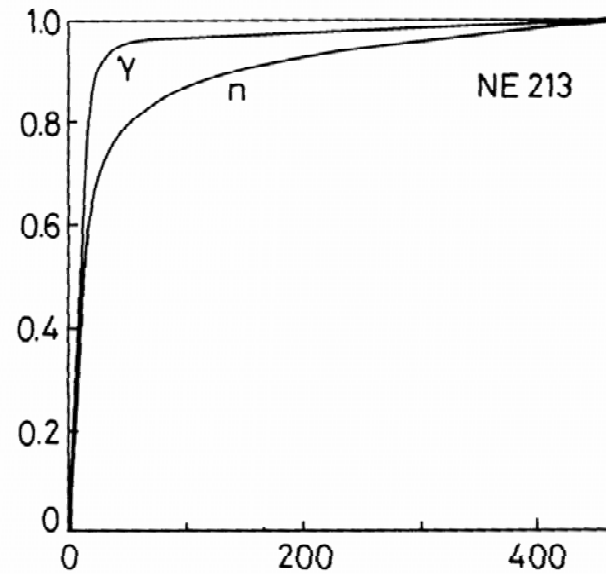
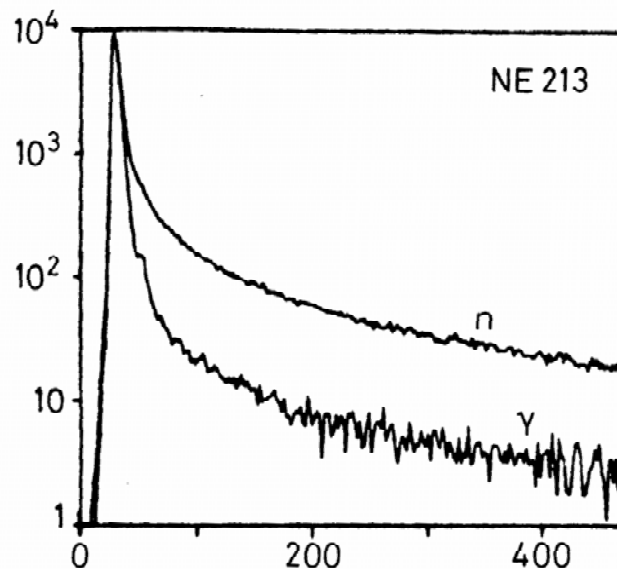
- Discriminação por forma de pulso:
  - $\tau_f$  e  $\tau_s$  determinam a forma do sinal de saída
  - Certos materiais apresentam valores diferentes de  $\tau_f$  e  $\tau_s$  que dependem da natureza da partícula que gerou a radiação





# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

- Discriminação por forma de pulso:
  - Essa característica é MUITO importante pois permite diferenciar partículas pela forma do pulso gerado:



TIME [ns]

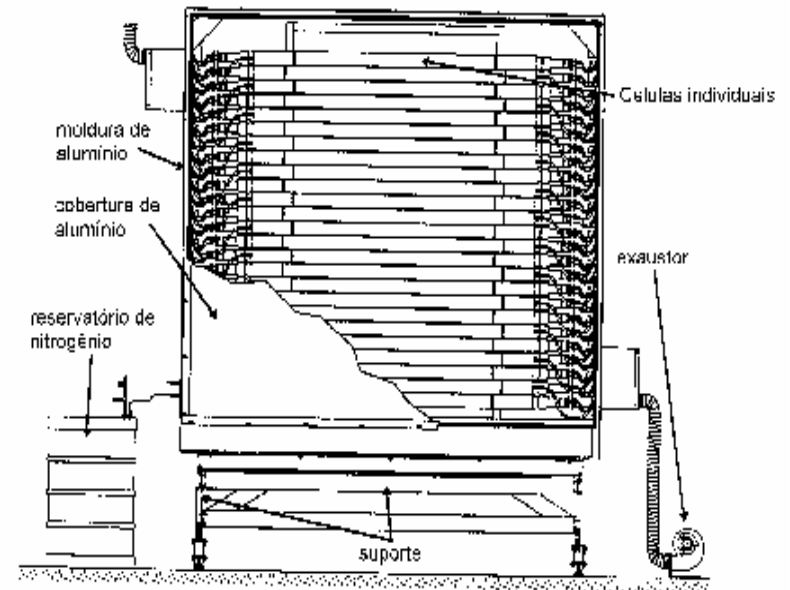
# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

---

- Tipos de materiais utilizados:
  - Cristais orgânicos;
  - **Líquidos orgânicos;**
  - Plásticos;
  - Cristais inorgânicos;
  - Gás;
  - Vidros.

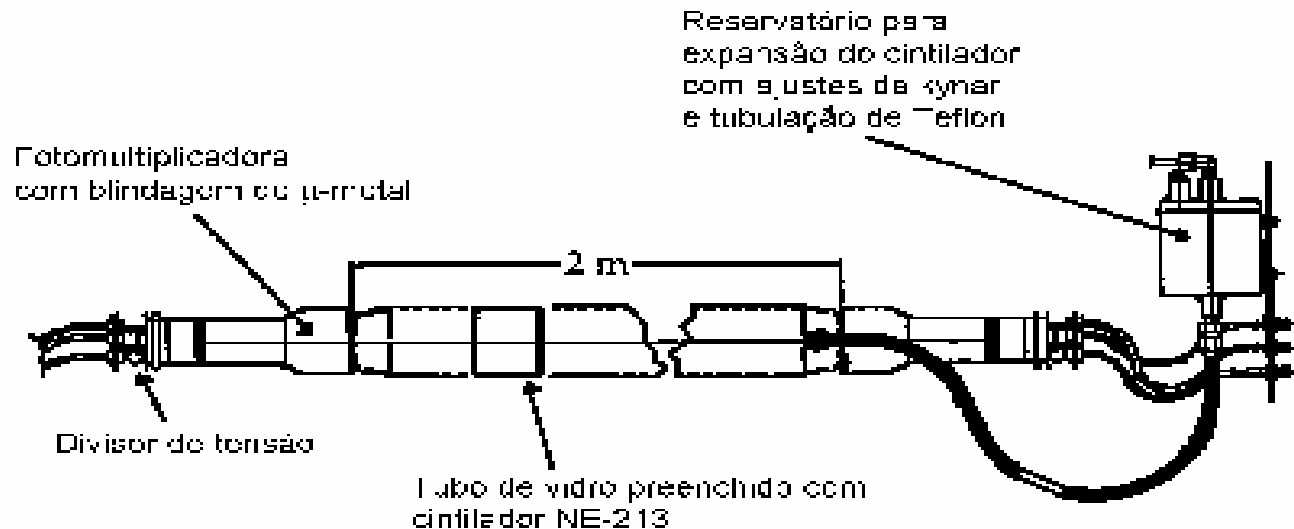
# A Parede de Nêutrons do Pelletron

- Detetor de nêutrons que utiliza um cintilador orgânico líquido (BC-501A) como agente ativo de detecção;
- A "Parede" possui uma área de  $2.0 \times 2.0 m^2$  a fim de maximizar a eficiência de detecção;



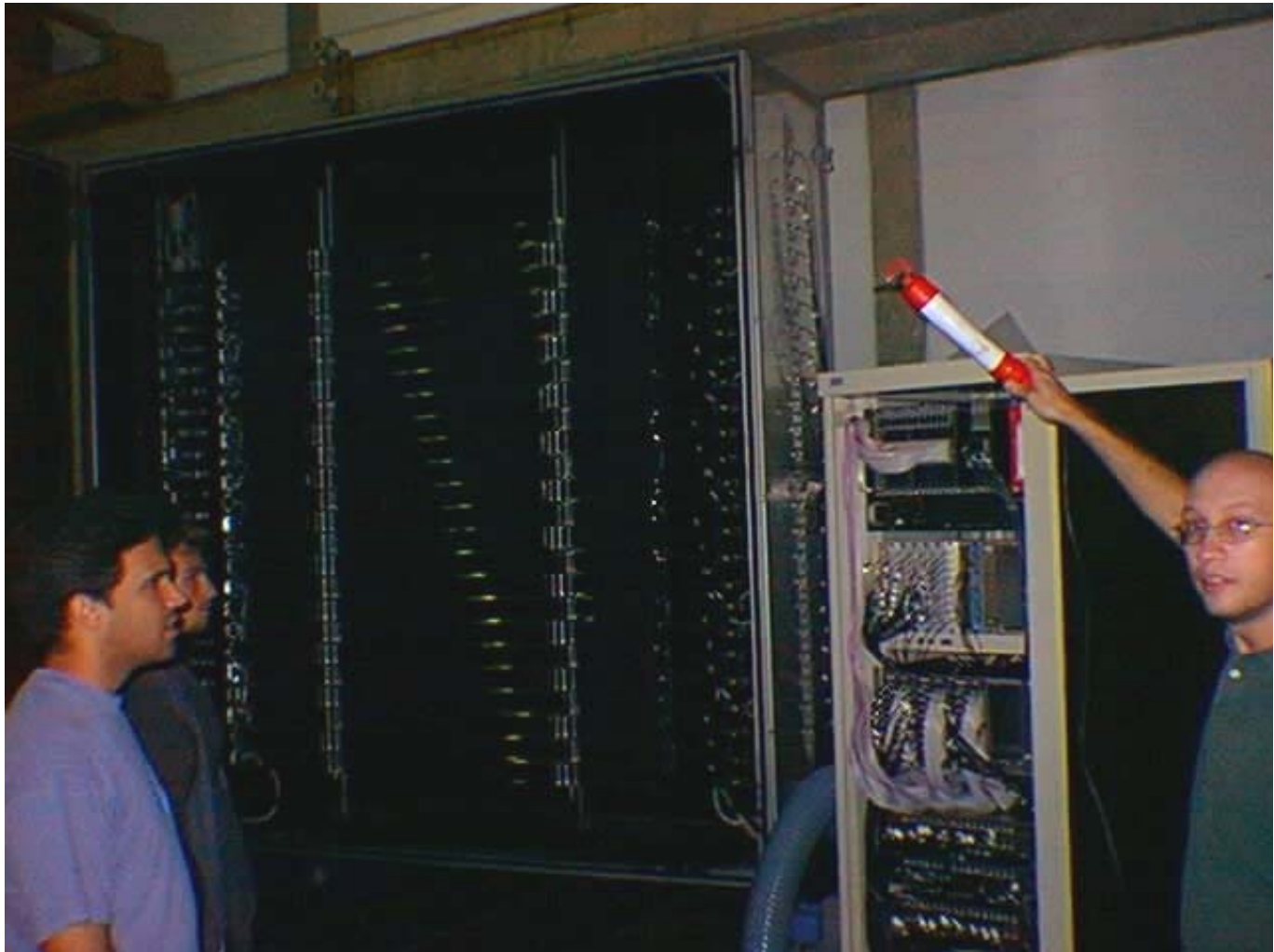
# A Parede de Nêutrons do Pelletron

- A Parede de nêutrons é composta de 24 células retangulares de pirex de seção quadrada de 8 cm, preenchidas com o cintilador líquido orgânico e com fotomultiplicadoras acopladas em cada extremidade



# A Parede de Nêutrons do Pelletron

---



# Eletrônica da Parede de Nêutrons

---

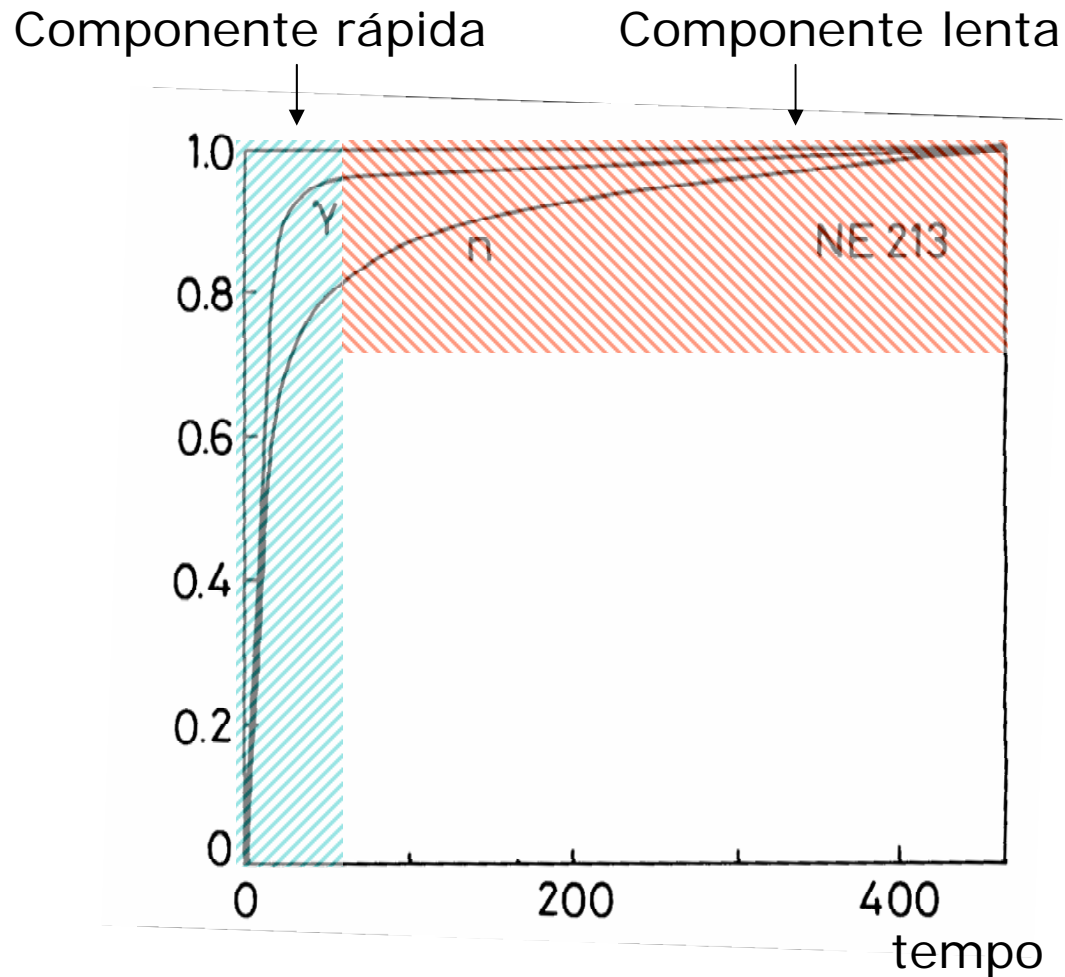
- O que é medido?
  - Integral da componente lenta do sinal (QDC slow);
  - Integral da componente rápida do sinal (QDC fast);
  - Instante em que o sinal foi gerado relativo a um sinal de referência comum a todas as células (TDC). Esse sinal de referência pode ser gerado por um sistema de feixe pulsado ou por um detetor de partículas carregadas.

# Eletrônica para a Discriminação por Forma de Pulso

---

- A componente lenta do sinal gerado por um nêutron deve ser maior do que aquela gerada por radiação  $\gamma$ ;
- Portanto, pode-se diferenciar as saídas geradas por essas diferentes partículas separando-se as componentes rápida e lenta do sinal.
- E como isso pode ser feito?

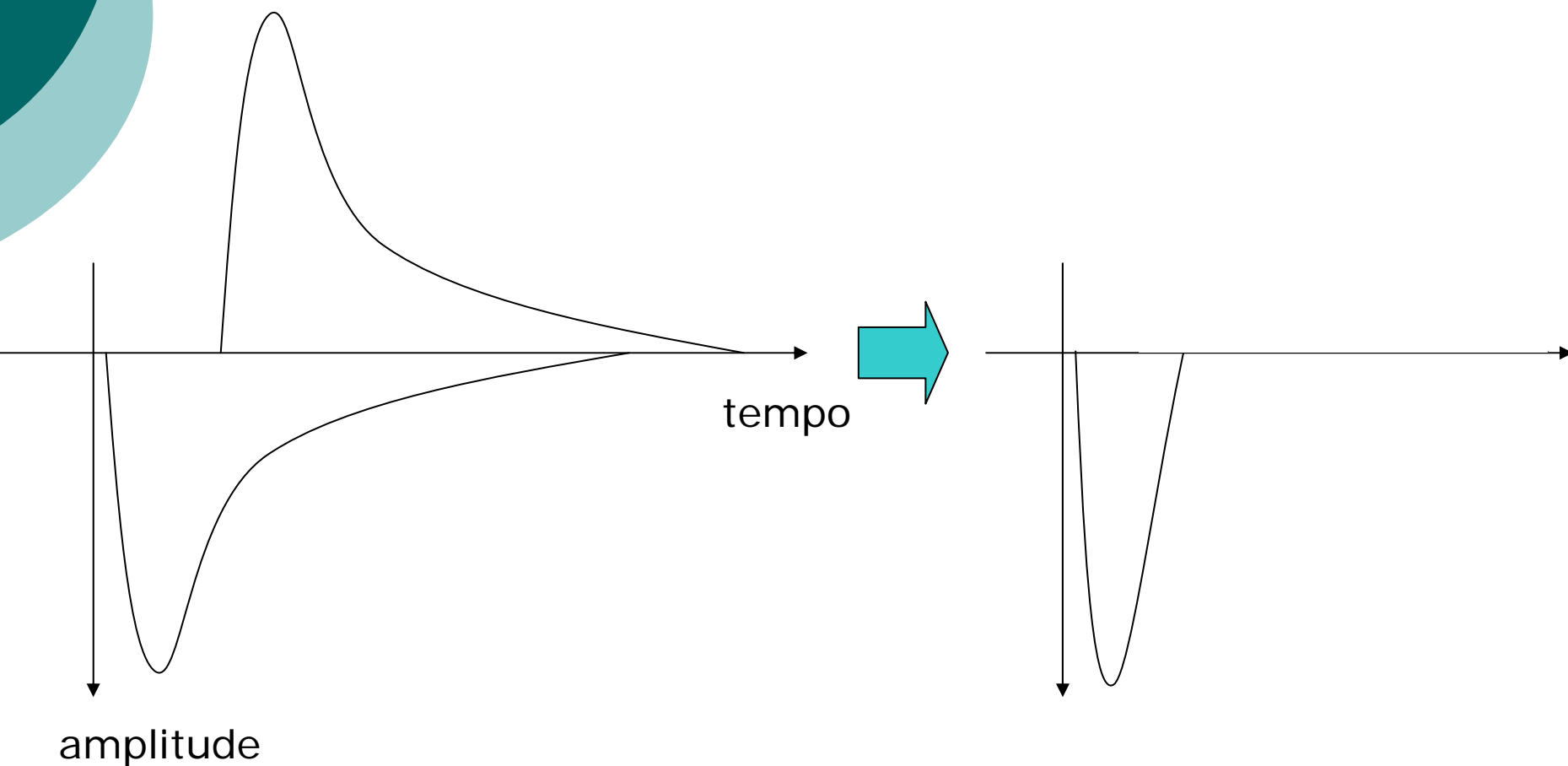
# Eletrônica para a Discriminação por Forma de Pulso





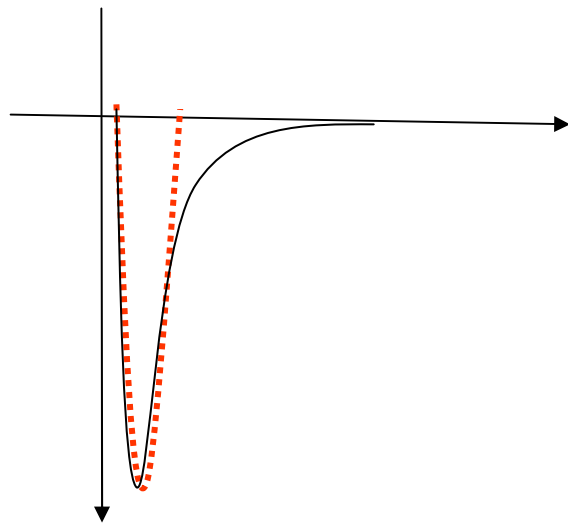
# Eletrônica para a Discriminação por Forma de Pulso

---

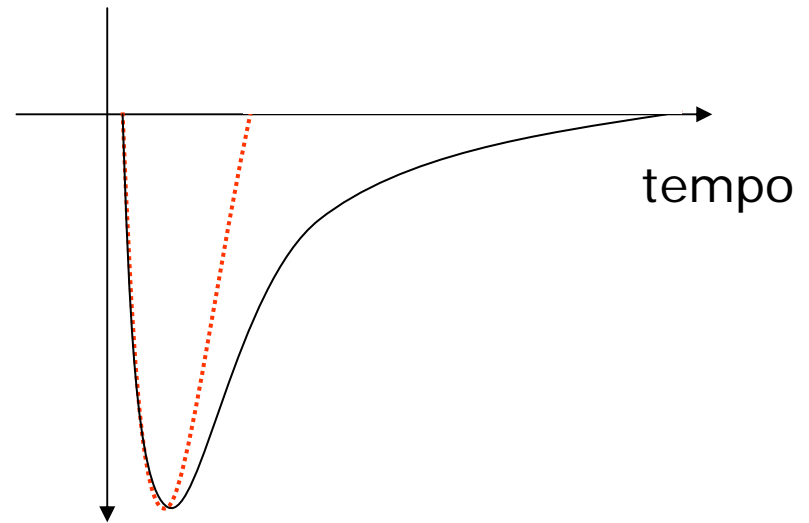


# Eletrônica para a Discriminação por Forma de Pulso

---



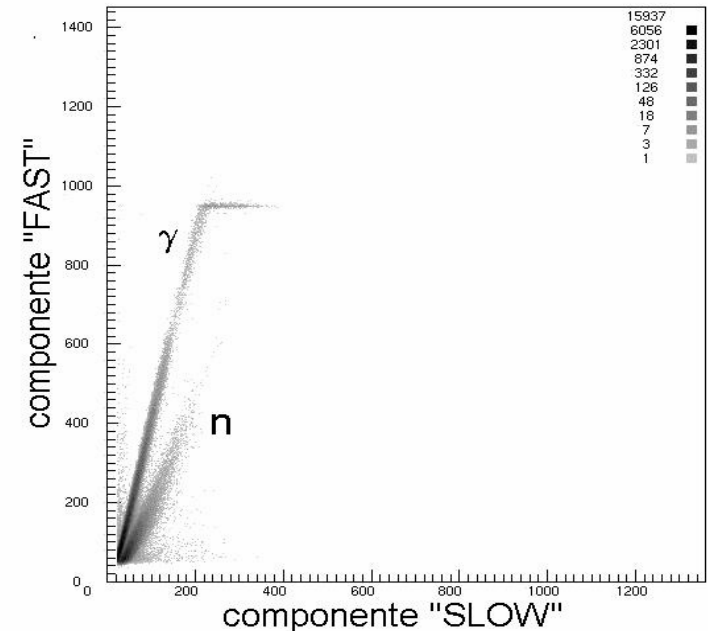
amplitude



tempo

# Resultados esperados

- Portanto, graficando a componente rápida em função da componente lenta, pode-se diferenciar nêutrons de radiação  $\gamma$



# Medida do tempo de vôo dos nêutrons até o detetor

---

- Mede-se o tempo de vôo dos nêutrons até o detetor através da média entre os sinais de tempo gerados pelas fotomultiplicadoras de cada extremidade de uma dada célula:

$$tdv = \frac{(t_{esquerda} + t_{direita})}{2}$$

# Medida da posição de interação dos nêutrons com o detetor

---

- Mede-se a posição na qual o nêutron interagiu com o detetor através da diferença entre os sinais de tempo gerados pelas fotomultiplicadoras de cada extremidade de uma dada célula:

$$x = v \cdot (t_{\text{esquerda}} - t_{\text{direita}})$$

sendo o parâmetro  $v$  determinado a partir da calibração do detetor.

# Medida da energia dos nêutrons

---

- Obtendo-se essa posição, pode-se calcular a distância de vôo do nêutron ( $d$ ), que combinado com seu tempo de vôo ( $tdv$ ) resultará na medida de energia da partícula ( $E$ ):

$$E = \frac{1}{2} m \left( \frac{d}{tdv} \right)^2$$

onde,  $m$  é a massa do nêutron

# Cálculo da eficiência do detetor

---

- A eficiência do detetor precisa ser estimada a partir de uma detalhada simulação;
- A simulação será realizada utilizando-se o programa GEANT4.

# Atividades programadas com o detetor

---

- Para hoje (09/02):
  - Familiarização com os vários sistemas que compõe o detetor e seu funcionamento ;
  - Aquisição de dados com fonte de AmBe.
- Ao longo da semana:
  - Primeiro teste do detetor em ambiente real de medida