



# Detetores de Neutrons

---

***Marcelo G Munhoz***

Técnicas Experimentais em Física de  
Partículas Elementares



# Detetores de Nêutrons

---

Princípio básico de funcionamento:

- Conversão da energia do nêutron para uma partícula carregada

nêutron + núcleo alvo →

- núcleo de recuo
- próton
- partícula  $\alpha$
- fragmentos de fissão



# Nêutrons Lentos × Nêutrons Rápidos

---

- Nêutrons Lentos (têrmicos):
  - 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

---

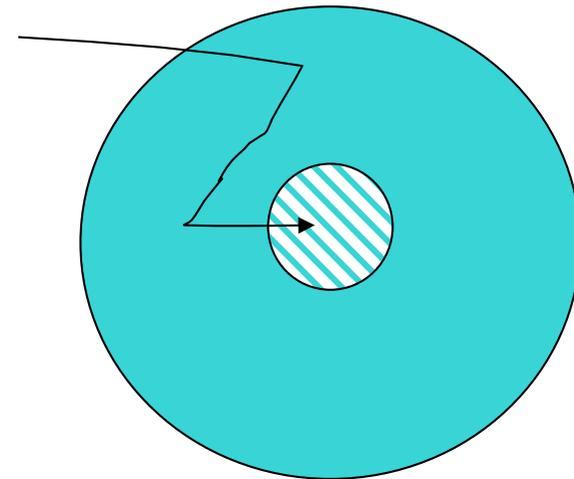
- Nêutrons Rápidos:
  - Mais energéticos ( $> 0.5 \text{ eV}$ )
  - Presentes nas reações estudadas em aceleradores de partículas
  - É possível medir sua energia (para valores acima de 10 a 100 *KeV*)

# 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

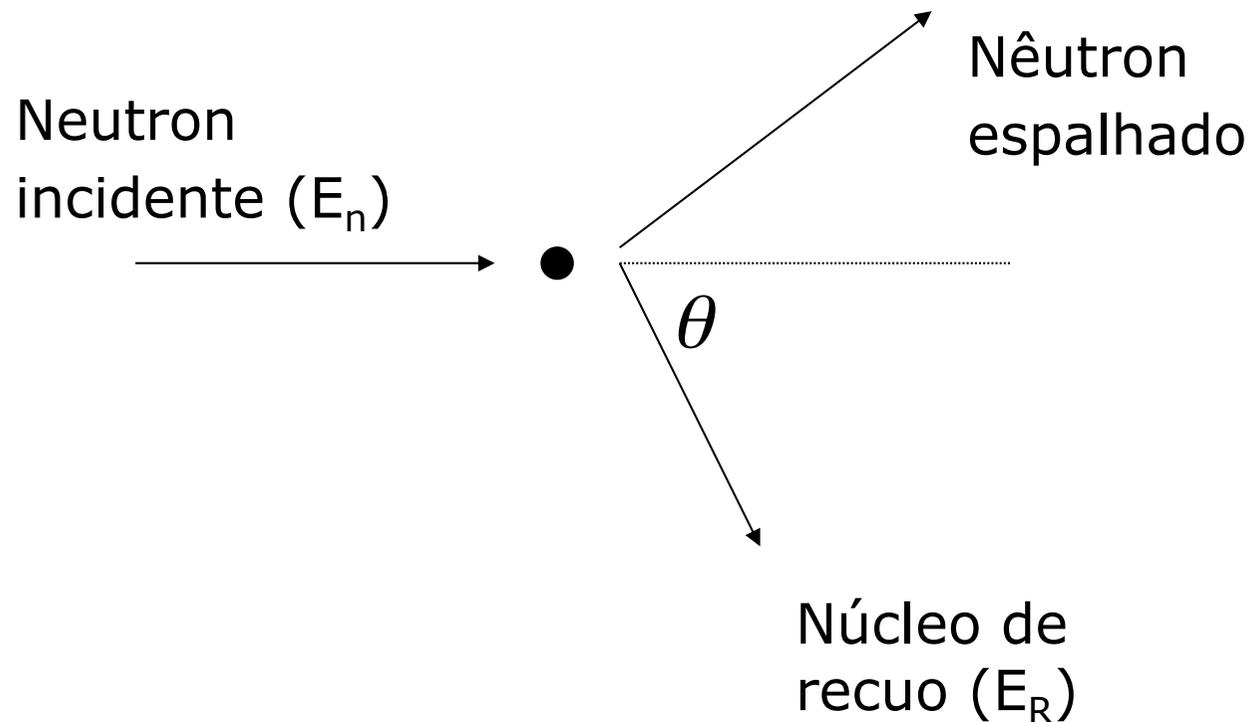
---

- Espalhamento:
  - Utiliza-se do espalhamento elástico de nêutrons ( $Q = 0$ ) para deteta-los
  - Tipos de detetores de espalhamento:
    - Detetores a Gás
    - Telescópios
    - Cintiladores
- Neste experimento: **detetor de espalhamento com cintilador**

# Deteção de Nêutrons Rápidos por Espalhamento

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

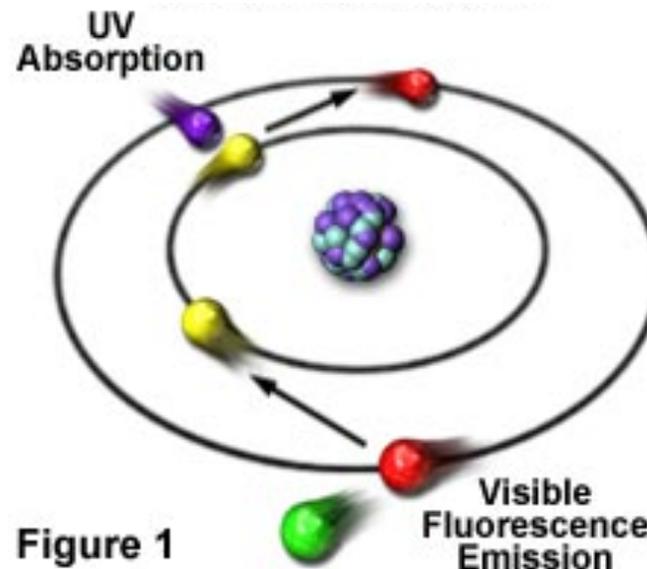
Portanto, se  $A=1$   
 $\rightarrow E_R = E_R^{\text{MAX}}$



# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

---

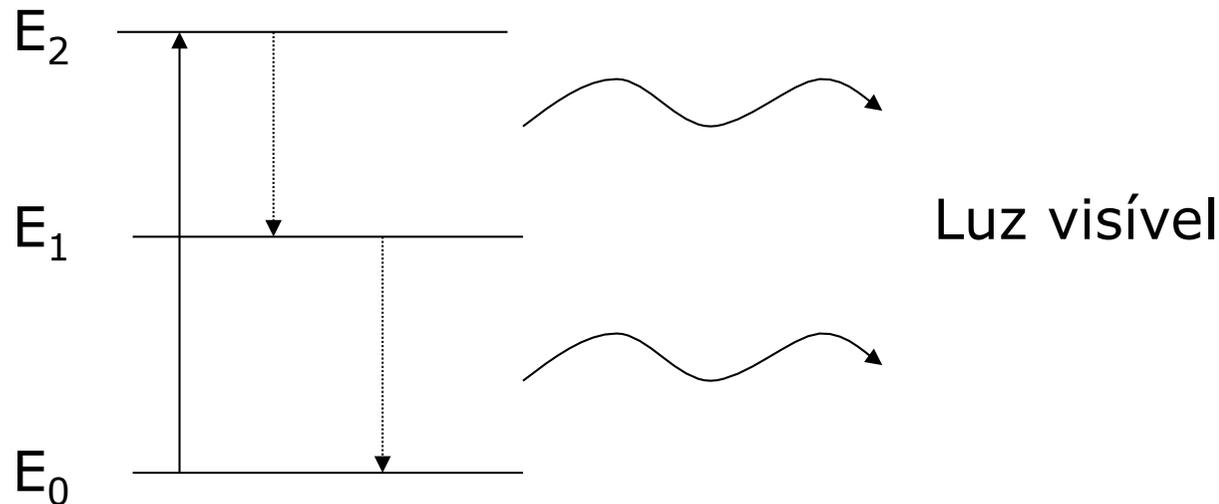
- Princípio de funcionamento: **luminescência** – absorção da energia e reemissão na forma de radiação visível



# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

---

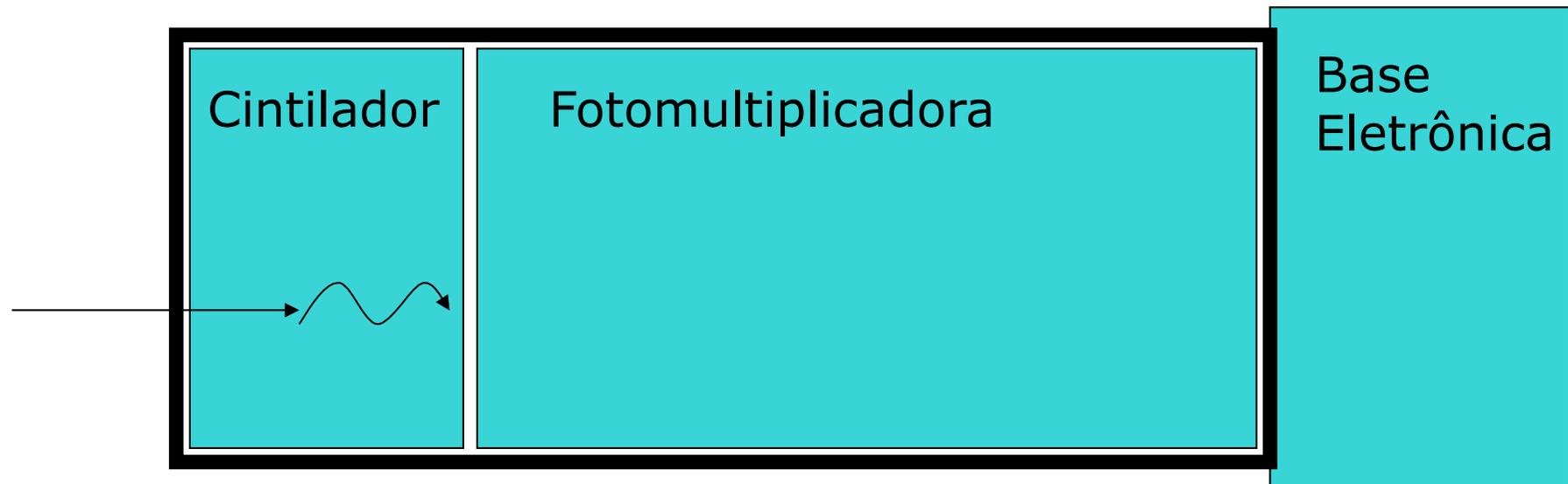
- Princípio de funcionamento: **luminescência** – absorção da energia e reemissão na forma de radiação visível



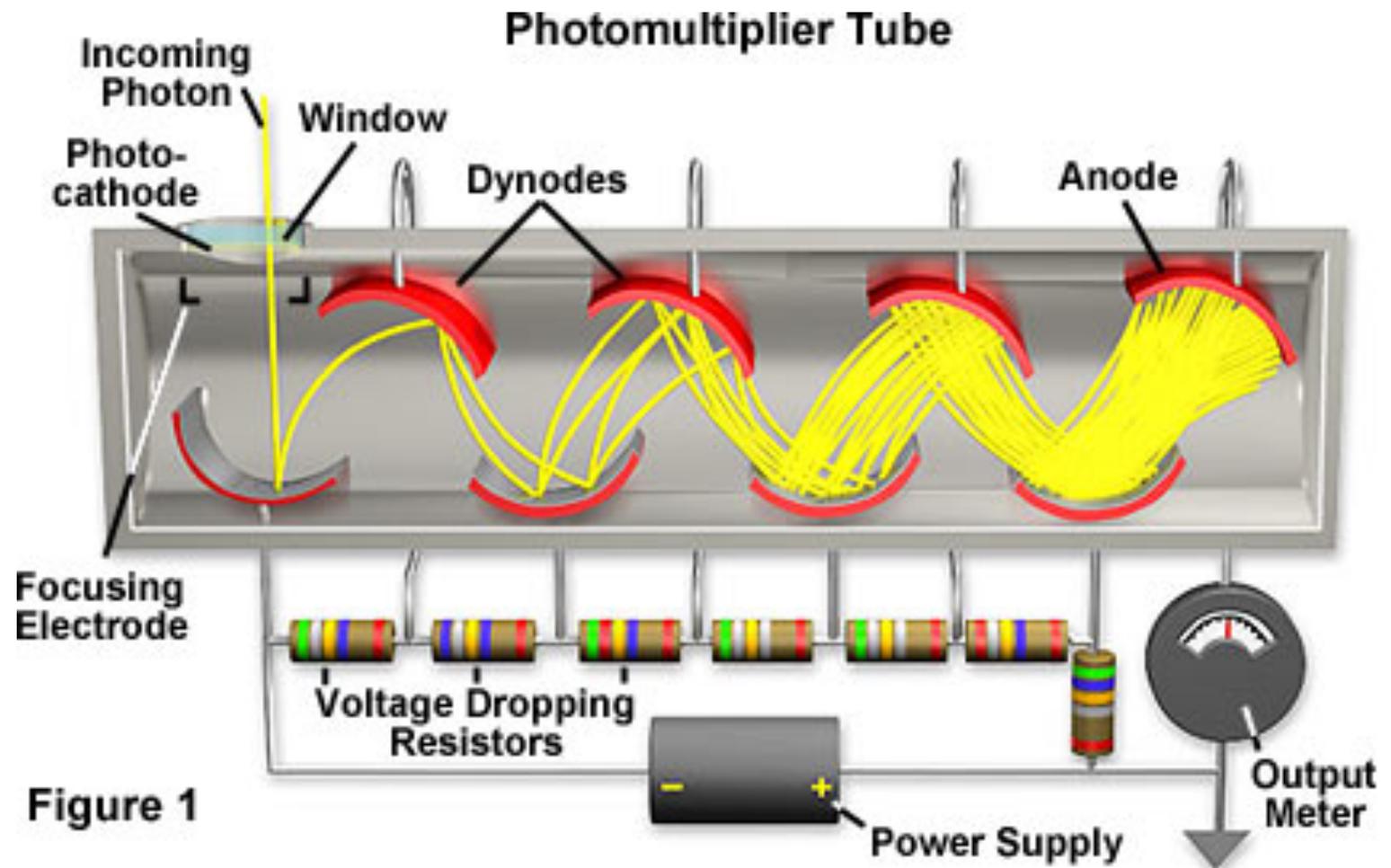
# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

---

- 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 detector 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 ( $\varepsilon$ ):

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

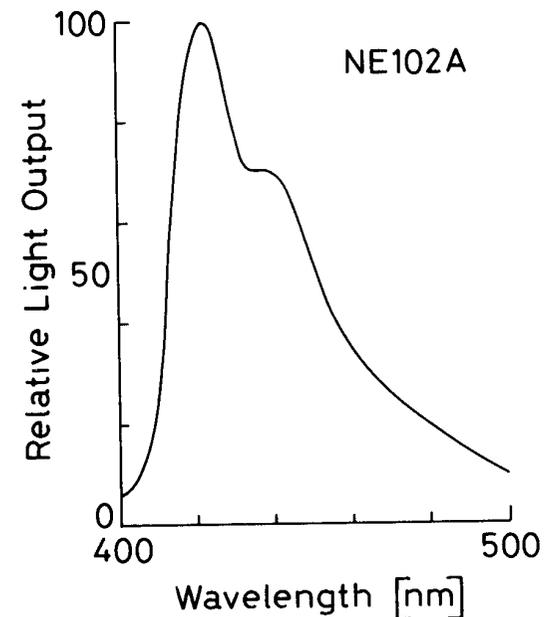
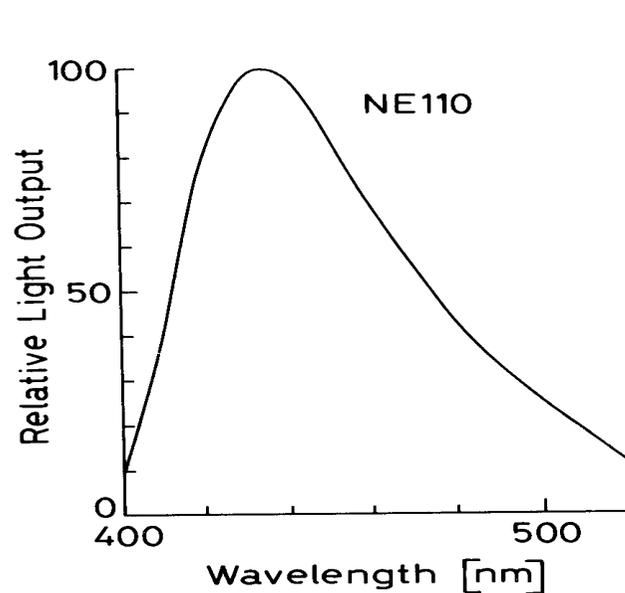
onde:

- $N$  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

---

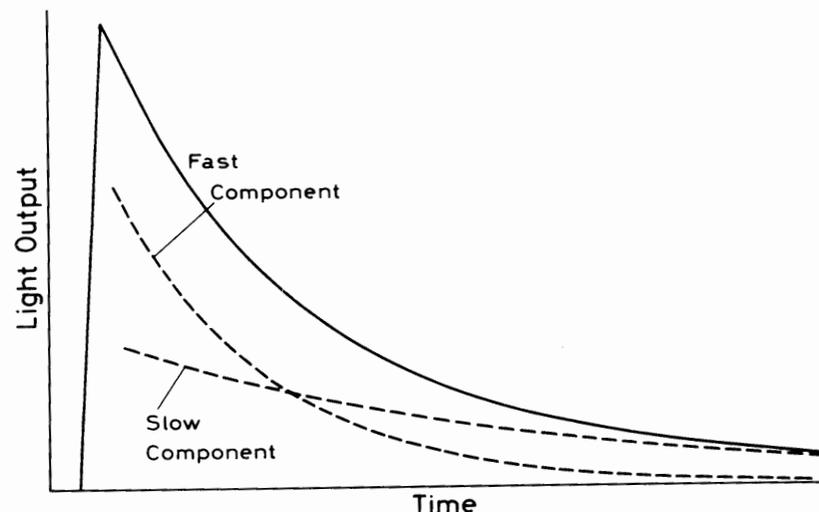
- O processo de reemissão é descrito pela expressão:

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

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.

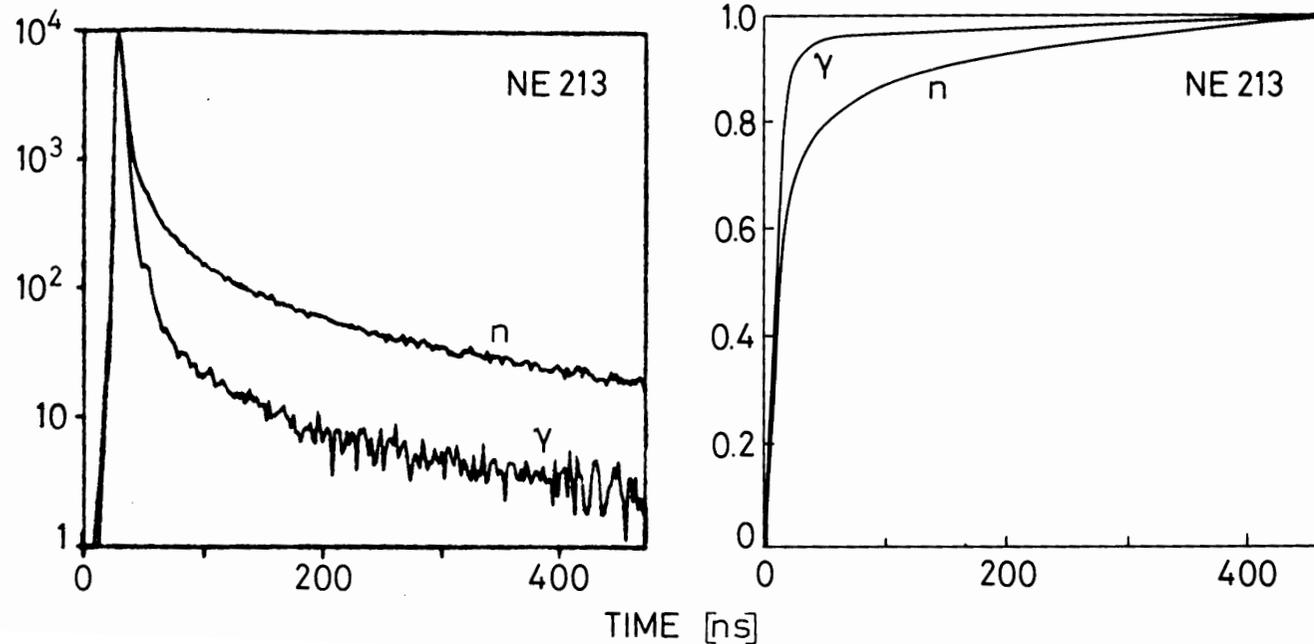
# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

- 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:





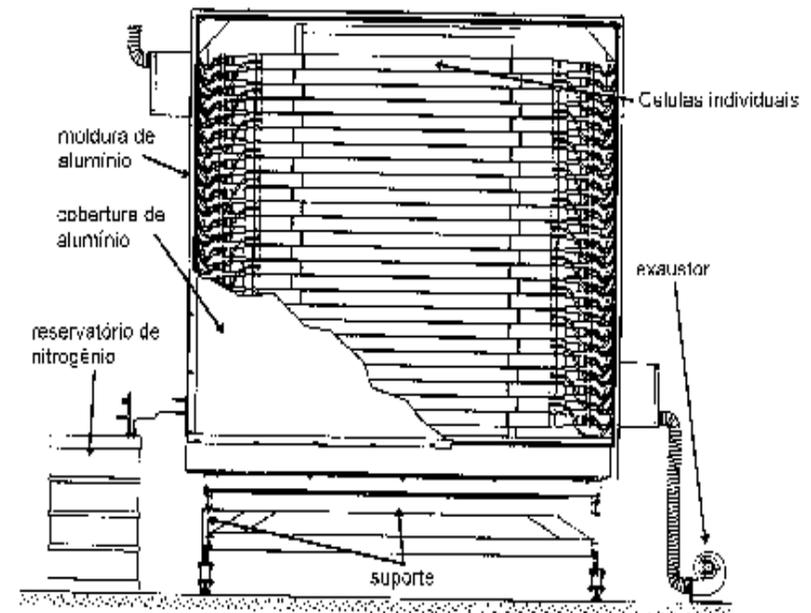
# Cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos

---

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

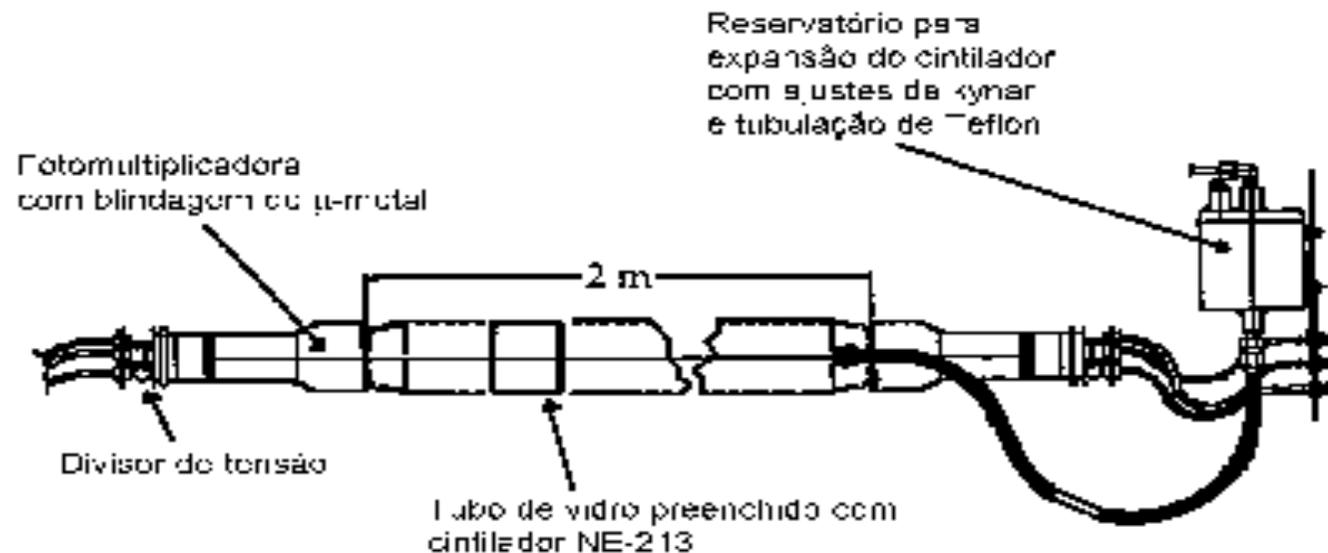
# A Parede de Nêutrons do Pelletron

- 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



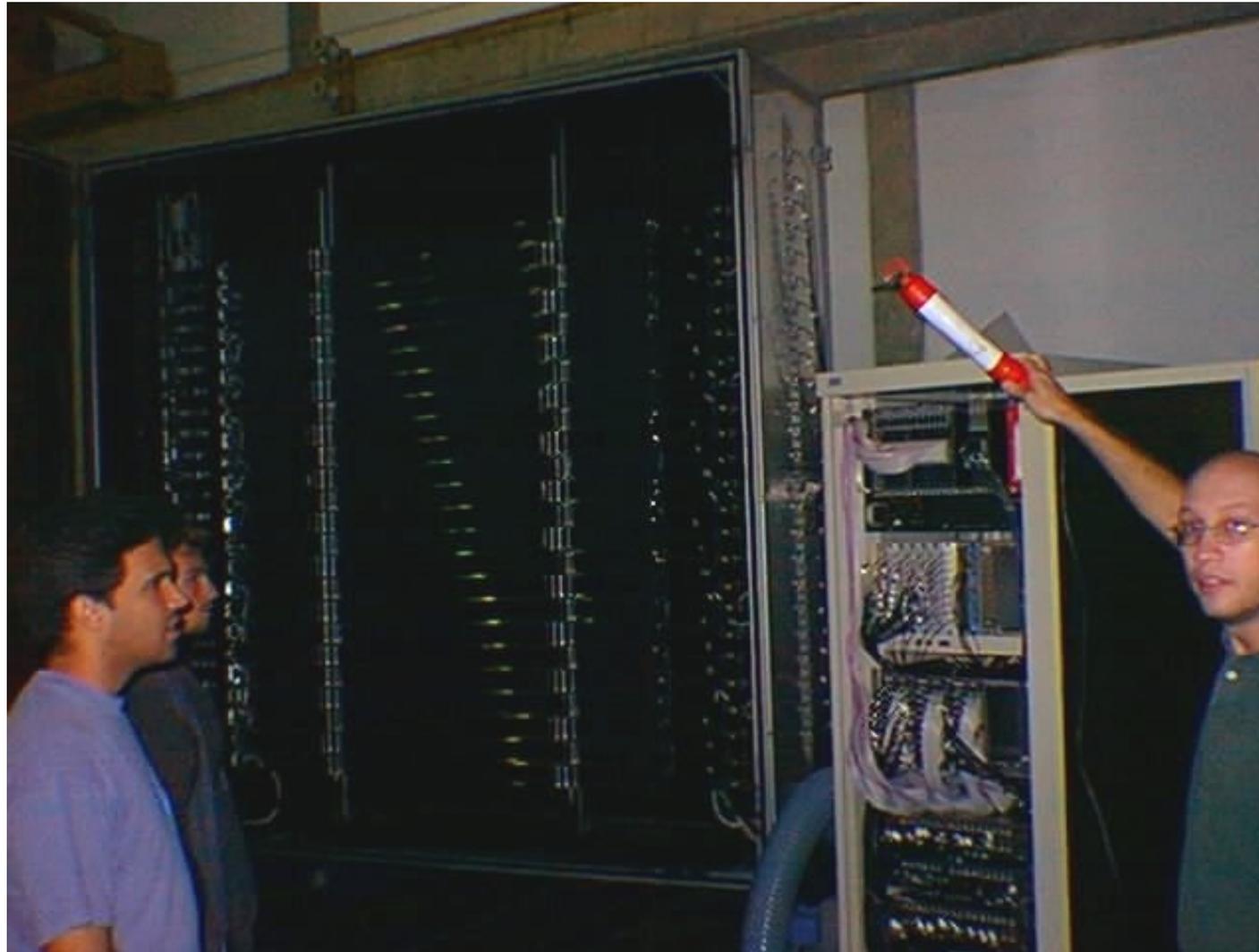
# A Parede de Nêutrons do Pelletron

- 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.

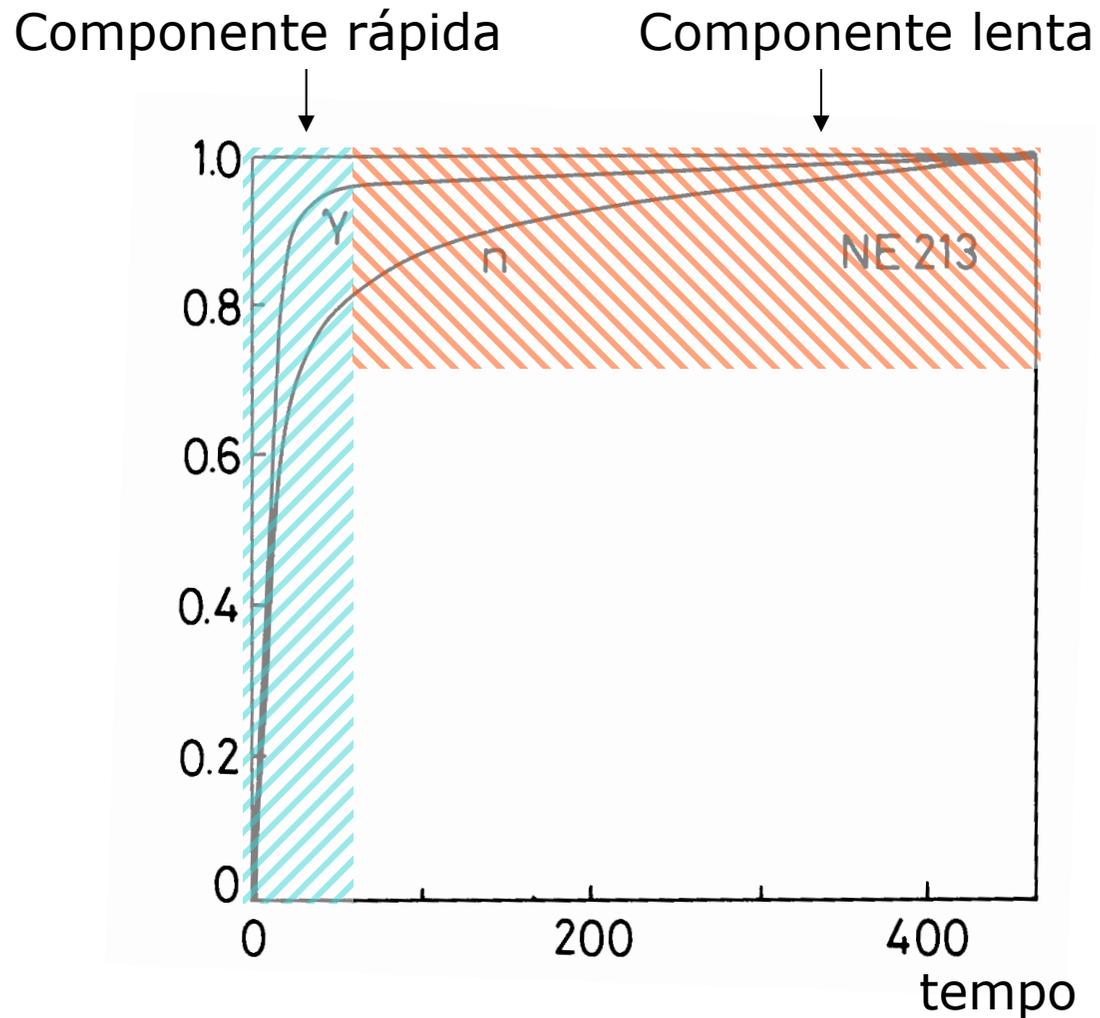


# Eletrônica para a Discriminação por Forma de Pulso

---

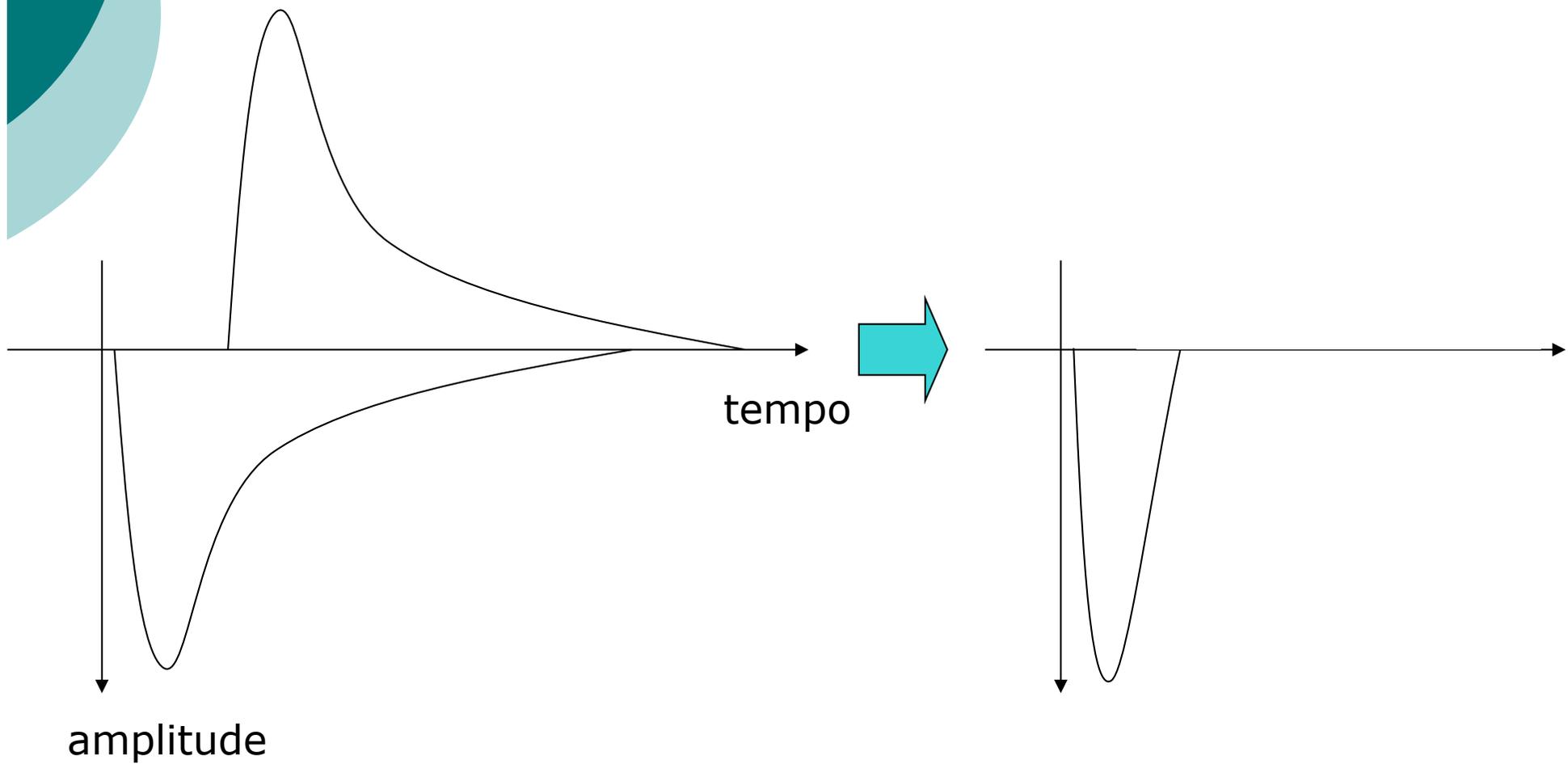
- A componente lenta do sinal gerado por um nêutron deve ser maior do que aquela gerada por radiação  $\gamma$
- Portanto, pode-se diferenciar as saídas geradas por essas diferentes partículas separando-se as componentes rápida e lenta do sinal
- E como isso pode ser feito?

# Eletrônica para a Discriminação por Forma de Pulso



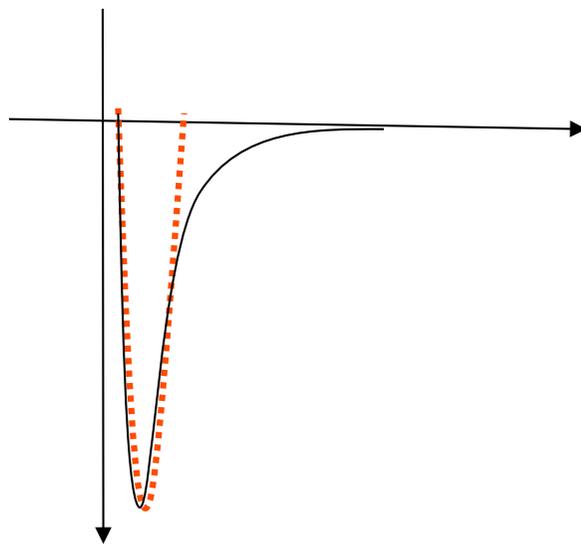
# Eletrônica para a Discriminação por Forma de Pulso

---

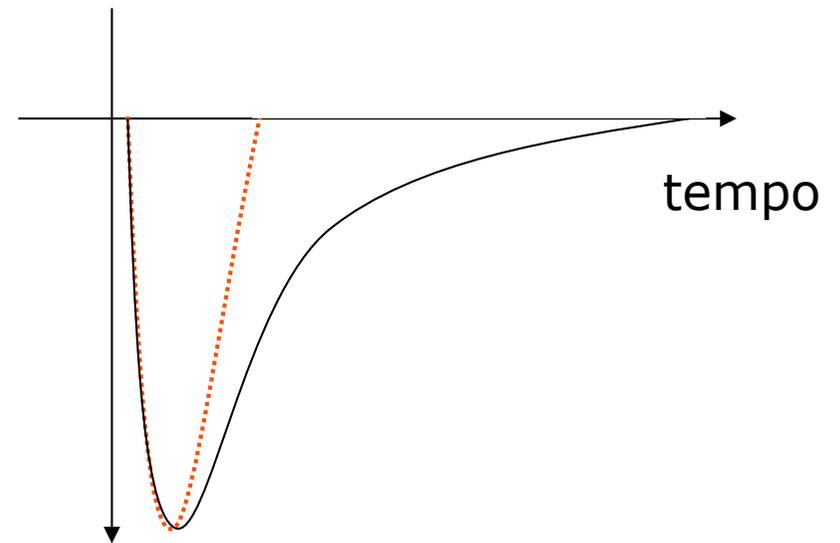


# Eletrônica para a Discriminação por Forma de Pulso

---

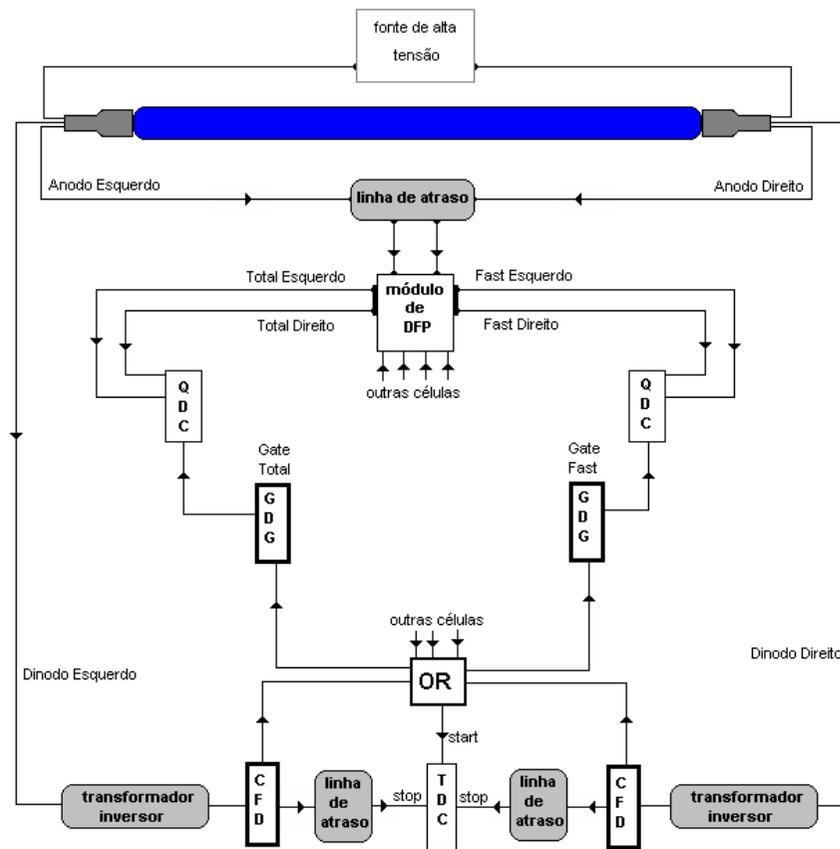


amplitude



tempo

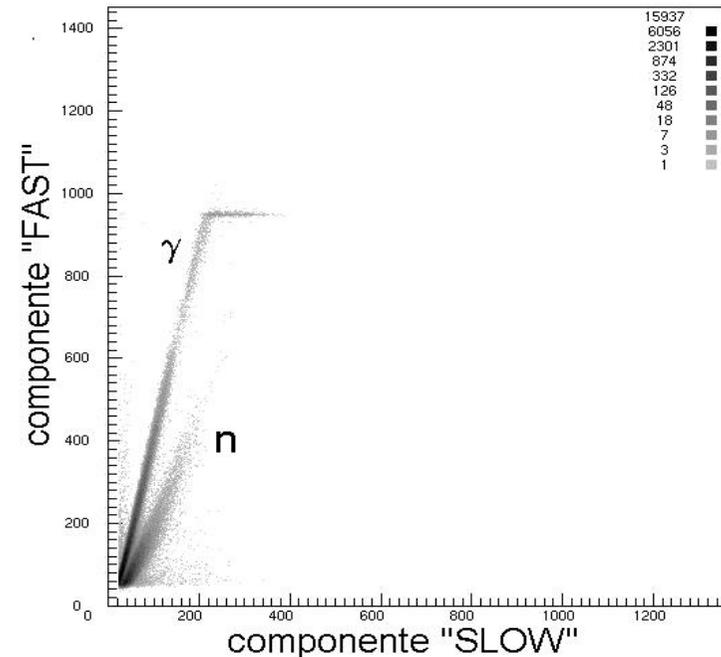
# Esquema da Eletrônica



Legenda:  
CFD = constant fraction discriminator  
GDG = gate and delay generator  
TDC = time to digital converter  
QDC = charge to digital converter

# 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:

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



## 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



## Primeira Atividade com o Detetor

---

- Familiarização com os vários sistemas que compõe o detetor e seu funcionamento
- Medida da resolução em posição e eficiência relativa (à posição) com uma fonte de radiação gama



# Primeira Atividade com o Detetor

---

## ○ Etapas da medida

- Considerar um dos lados de uma célula como START e outro como STOP das medidas de TDC
- Medir o sinal de STOP de uma célula sem fonte radioativa (medida de fundo)
- Medir o sinal de STOP com a fonte radioativa colocada em diferentes posições conhecidas da célula (medida em relação a uma das extremidades)



# Primeira Atividade com o Detetor

---

## ○ Análise dos dados

- Utilizar a medida de fundo a fim de calcular a eficiência relativa à posição do detetor (como?)
- Subtrair a medida de fundo das medidas com a fonte radioativa. O que resta no espectro?
- Utilizar o espectro subtraído acima para calcular a posição da fonte em unidades de TDC



# Primeira Atividade com o Detetor

---

- **Análise dos dados**
  - Elaborar uma curva de calibração correlacionando os dados obtidos no item anterior com a posição conhecida da fonte e calcular a velocidade de propagação da luz no cintilador.
  - Comparar com o valor esperado.
  - Corrigir os dados do espectro subtraído pela eficiência encontrada com as medidas de fundo. O resultado obtido corresponde ao esperado?



## Segunda Atividade com o Detetor

---

- Familiarização com a identificação de nêutrons a partir da forma do sinal
- Medida da componente rápida do sinal em função do sinal total e da componente lenta do sinal a fim de verificar se há alguma mudança na identificação de nêutrons entre essas duas abordagens



## Segunda Atividade com o Detetor

---

- Etapas da medida
  - Medir a componente rápida em função do sinal total, considerando-se apenas o fundo experimental (sem fonte de nêutrons), observando os sinais das fotomultiplicadoras e do *gate* no osciloscópio
  - Observar o gráfico da componente rápida em função do sinal total
  - Repetir a medida colocando a fonte de nêutrons em frente ao detetor e observar a mudança no gráfico acima. Surgiu uma segunda banda?



## Segunda Atividade com o Detetor

---

### ○ Etapas da medida

- Modificar o atraso e/ou largura do *gate* a fim de medir apenas a componente lenta do sinal (ao invés do sinal total)
- Verificar o resultado dessa mudança no gráfico da componente rápida em função da componente lenta. Como fica a identificação de nêutrons? Melhora? Como quantificar a mudança?