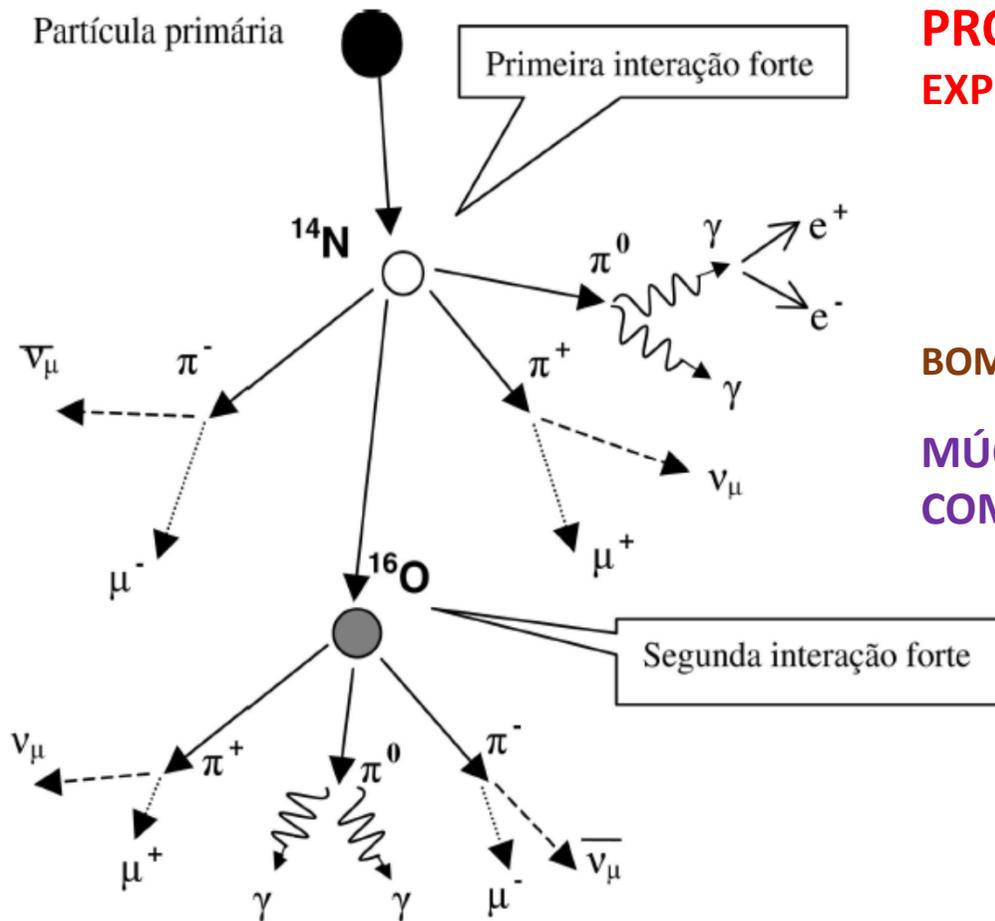


VIDA MÉDIA DOS MÚONS

RAIOS CÓSMICOS



**PRÓTONS INTERAGEM COM NÚCLEOS DA ATMOSFERA
EXPLOÇÃO DE SUPERNOVAS**

- CAMINHO LIVRE MÉDIO PARA INTERAÇÃO $\sim 89 \text{ g/cm}^2$

- NA SUPERFÍCIE, PRESSÃO CORRESPONDE A 1033 g/cm^2
BOM! POUCOS PRÓTONS CHEGAM NA SUPERFÍCIE

MÚONS SÃO PRODUZIDOS NA MAIORIA NO PRIMEIRO
COMPRIENTO DE INTERAÇÃO

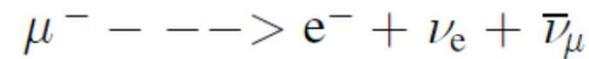
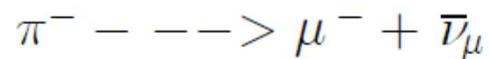
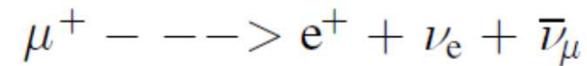
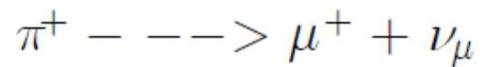
DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA ATMOSFERA \sim EXPONENCIAL
COM ESCALA $h_0 = 7600 \text{ m}$

$$89 = 1033 \cdot \exp(-h/h_0) \quad \text{formação em } h \sim 18000 \text{ m}$$

VIDA MÉDIA DOS MÚONS

MÚONS NA SUPERFÍCIE

COM PERDA DE ENERGIA DE $\sim 1,8 \text{ MeV g / cm}^2$, MÚONS DEVEM TER ENERGIA INICIAL DE $\sim 5 \text{ GeV}$



$$dN = -N(t)\lambda dt,$$

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$$

$$t = \frac{15000 \text{ m}}{2,992 \times 10^8 \text{ (m/s)}} \cong 50,54 \mu\text{s}$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-22,97 \cdot \tau_\mu / \tau_\mu} \cong 1,0 \times 10^{-10}$$

ESTRANHO!

NÃO CHEGARIAM MÚONS NA SUPERFÍCIE!

VIDA MÉDIA DOS MÚONS

MÚONS NA SUPERFÍCIE

NÃO PODEMOS ESQUECER DA RELATIVIDADE!

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0 \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad E_\mu \cong 5 \text{ GeV} \quad \gamma = \frac{E_\mu}{m_{0\mu} c^2} \cong 47,32..$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-22,97\tau_\mu / 47,32\tau_\mu} \cong e^{-0,48} \cong 0,62$$

POR OUTRO LADO ...

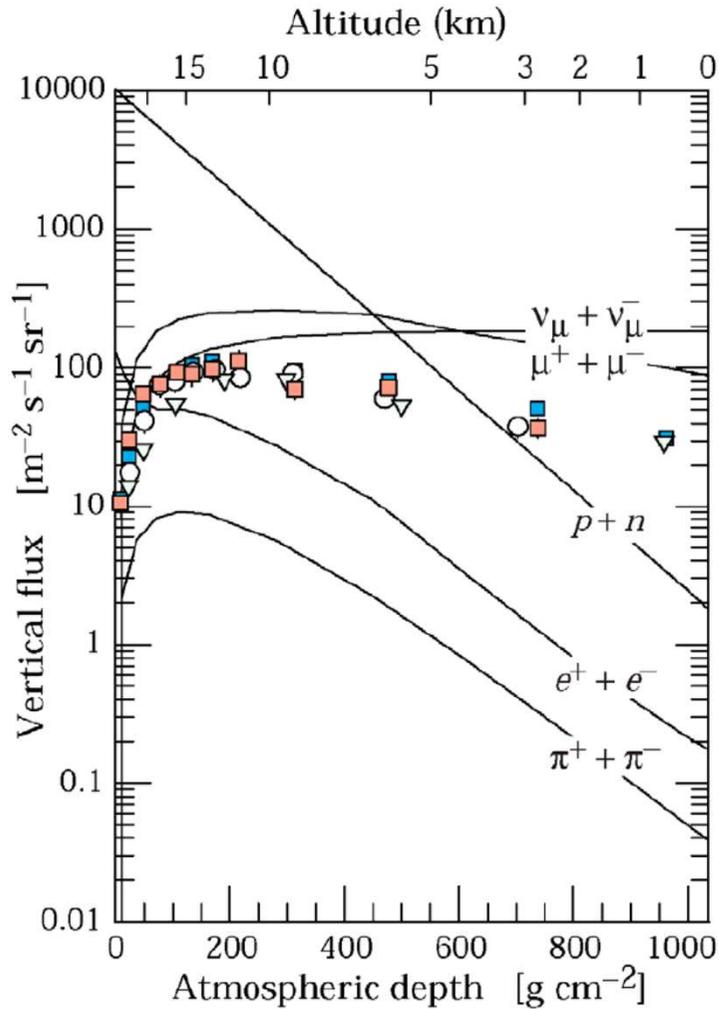
$$L = \frac{L_0}{\gamma} \quad L = \frac{15000}{47,32} \cong 317 \text{ m.} \quad t = \frac{317 \text{ (m)}}{2,997 \times 10^8 \text{ (m/s)}} \cong 1,06 \mu\text{s.}$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{(-0,48\tau_\mu / \tau_\mu)} \cong 0,62$$

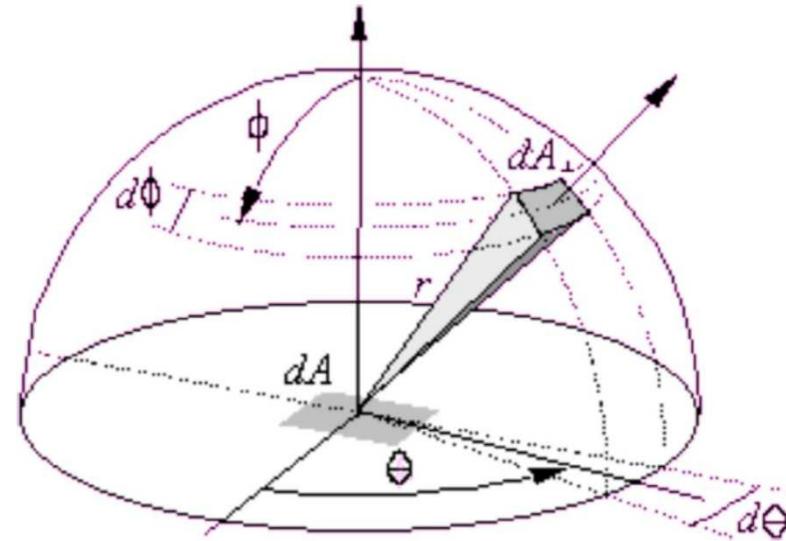
AGORA PARECE MAIS RAZOÁVEL!!

VIDA MÉDIA DOS MÚONS

MÚONS NA SUPERFÍCIE



$$I_{TRR} = 220 \times 0,62 \cong 136 \text{ múons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr})$$



$$\Omega = \frac{A}{R^2}$$

DETECTORES DE RADIAÇÃO

Dispositivos capazes de indicar a presença de radiação ionizante

Geração de carga elétrica → Sinal elétrico
Geração de luz → Sinal elétrico

Radiações interagem de forma diferente com a matéria

Radiação eletromagnética
Partículas carregadas
Nêutrons

Escolha do detector depende do tipo de radiação de interesse
Detector que mede com eficiência um tipo de radiação pode ser inadequado para medir outro tipo

DETECTORES DE RADIAÇÃO

INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

a) PARTÍCULAS CARREGADAS

- Força coulombiana entre a carga positiva e a negativa de elétrons dos átomos absorvedores. Pode também ocorrer interação nuclear, pouco provável.
- Pode ocorrer excitação ou ionização
- Partícula perde energia à medida que atravessa o meio
- Grandeza importante: Stopping Power $S = - \frac{dE}{dx}$

b) RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

- Efeito fotoelétrico

Raio gama por exemplo, interage com um átomo e desaparece dando origem a fotoelétron.

- Efeito Compton

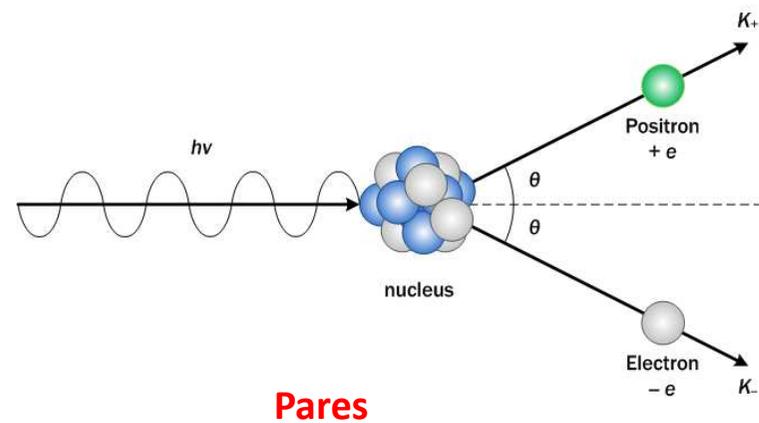
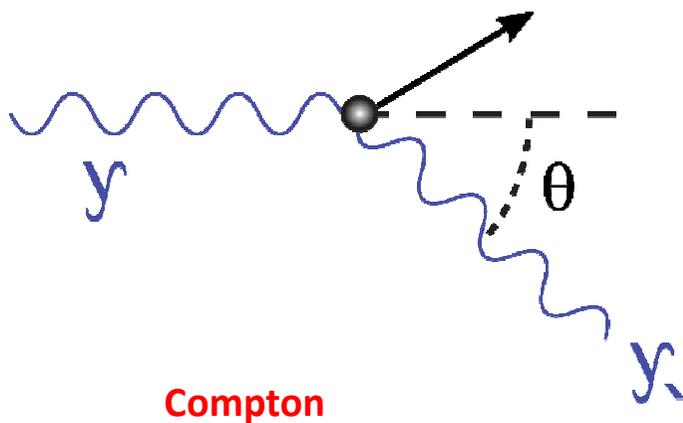
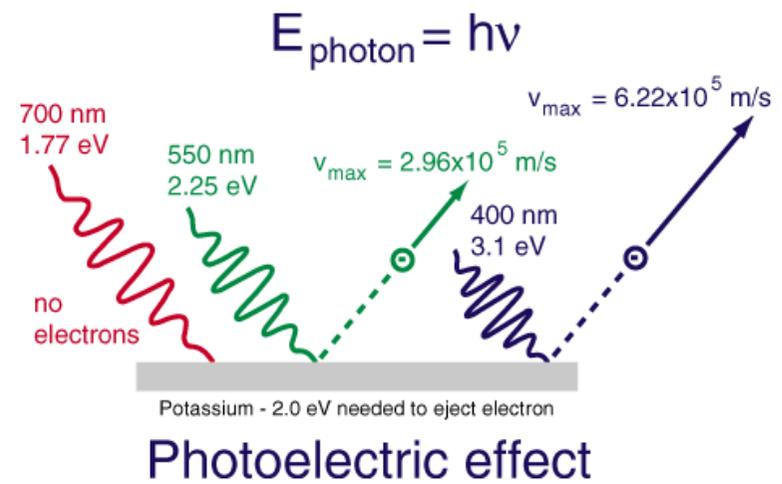
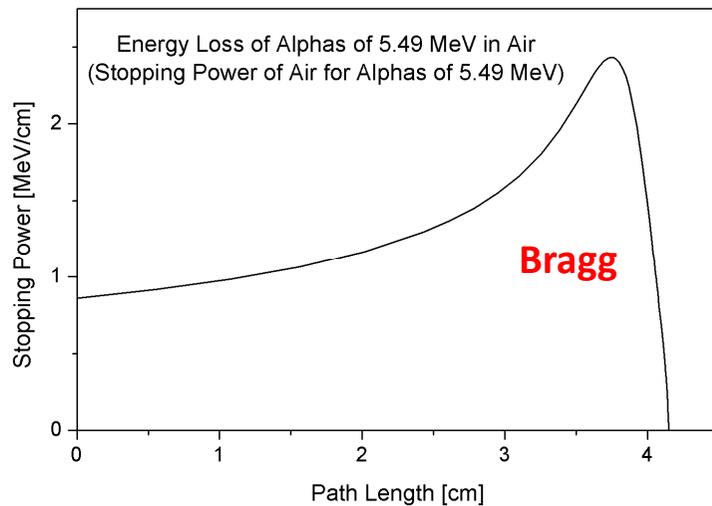
Espalhamento entre raio gama e elétron do material, gerando um raio gama espalhado e o elétron em recuo.

- Produção de pares elétron-pósitron

- Energia do raio gama excede duas vezes a energia da massa de repouso de um elétron
- Pósitron é aniquilado

DETECTORES DE RADIAÇÃO

INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

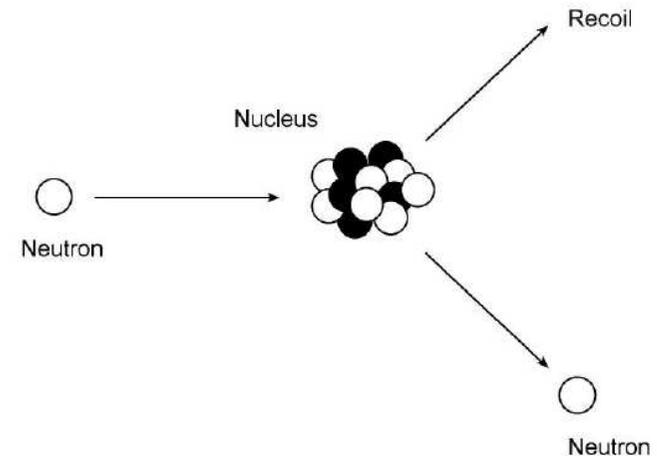
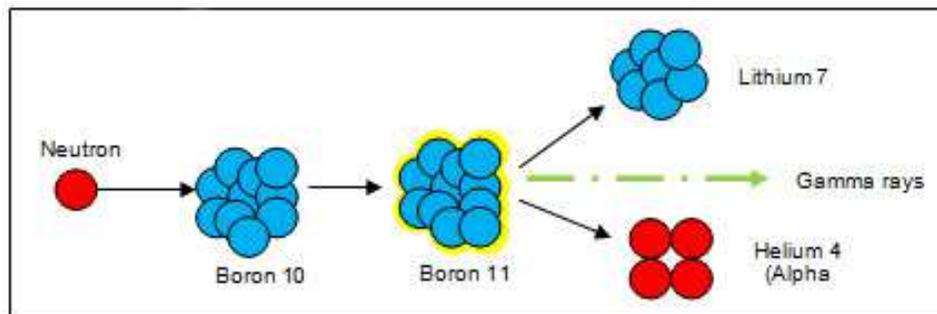


DETECTORES DE RADIAÇÃO

INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

c) NÊUTRONS

- Processo indireto
- Baixa energia --- Colisões elásticas e reações nucleares
- Altas energias --- Reações pouco prováveis e colisões mais adequadas pela maior transferência de energia
- Tempo de voo



DETECTORES DE RADIAÇÃO

CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DOS DETECTORES

a) SENSIBILIDADE

- Capacidade de gerar um sinal adequado para um dado tipo de radiação e energia.
- Detectores são projetados para serem sensíveis a um dado tipo de radiação e dado intervalo de energia

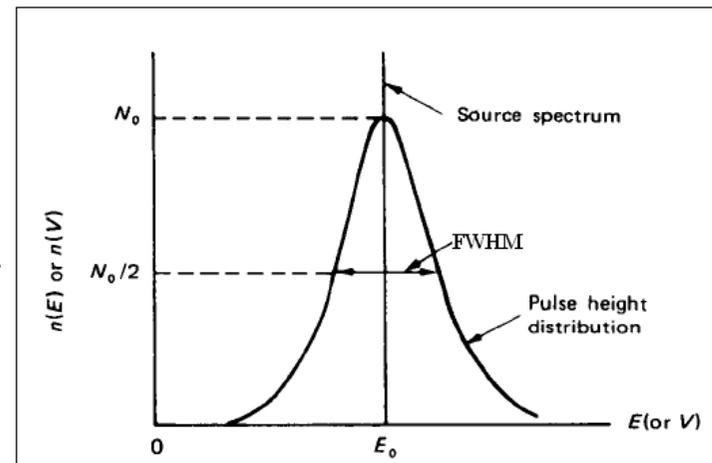
b) RESPOSTA

- Relação entre a energia e a carga total ou amplitude do pulso (**linear é ideal**)
- Detectores podem aferir a presença de radiação e em muito casos a energia

c) RESOLUÇÃO EM ENERGIA

- Capacidade de distinguir entre duas energias próximas
- Geralmente relacionada à largura a meia altura do pico de radiação monoenergética

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



DETECTORES DE RADIAÇÃO

CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DOS DETECTORES

d) TEMPO DE RESPOSTA

- Tempo para formação do sinal após chegada da radiação
- Duração do sinal também é importante

e) EFICIÊNCIA

- Absoluta $\varepsilon_{\text{abs}} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos emitidos pela fonte}}$

- Intrínseca $\varepsilon_{\text{int}} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos incidentes no detector}}$

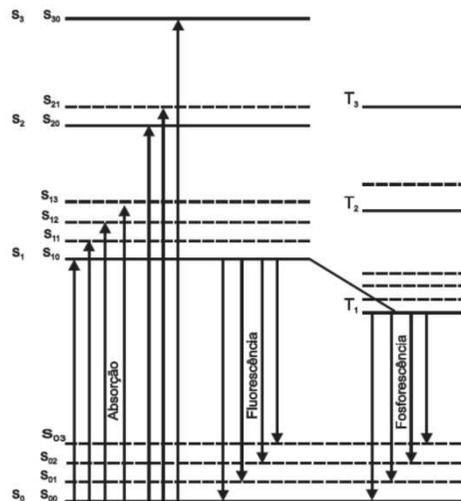
f) TEMPO MORTO

- Tempo para processar um evento (relacionado a duração do pulso). Detector pode ficar indisponível nesse intervalo (pulsos nesse intervalo são perdidos), ou não (*pile-up* e perda de informação)

DETECTORES DE RADIAÇÃO

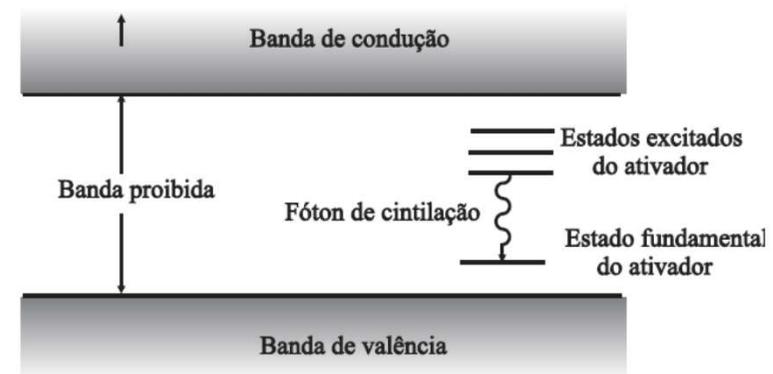
CINTILADORES

Orgânicos - transições na estrutura dos níveis de energia de uma molécula isolada. Pode ser observado para uma dada espécie molecular independentemente de seu estado físico.



FLUORESCÊNCIA
Rápida re-emissão
FOSFORESCÊNCIA
Lenta re-emissão
(no visível)

Inorgânicos - dependem de uma estrutura cristalina para que ocorra o processo de cintilação (e ativadores, para evitar re-excitação no retorno à banda de valência e permitir emissão no visível –intervalo de energia menor).



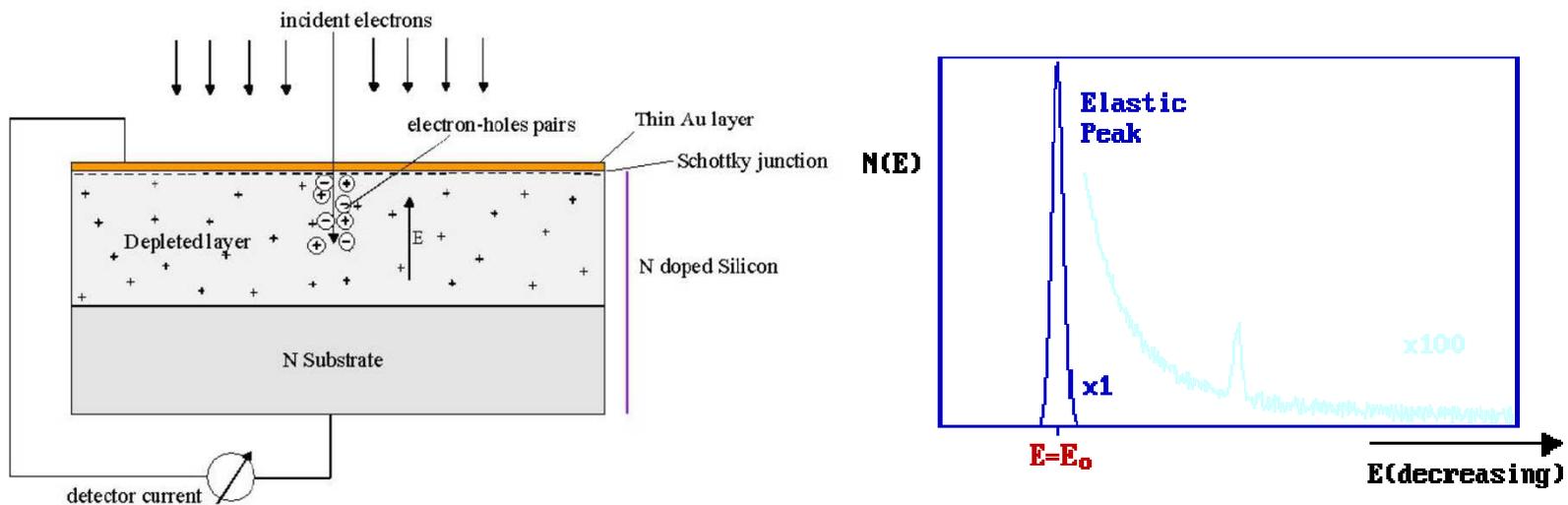
DETECTORES DE RADIAÇÃO

SEMICONDUCTORES

Princípio de funcionamento semelhante ao do cintilador inorgânico
Normalmente junções p-n de Si

Banda de valência e de condução, capazes de gerar o par elétron-buraco
(3,6 eV por par)

Devido à diferença de potencial entre os eletrodos do semiconductor, o elétron move-se rapidamente em direção ao anodo, impedindo que este volte ao estado fundamental.



DETECTORES DE RADIAÇÃO

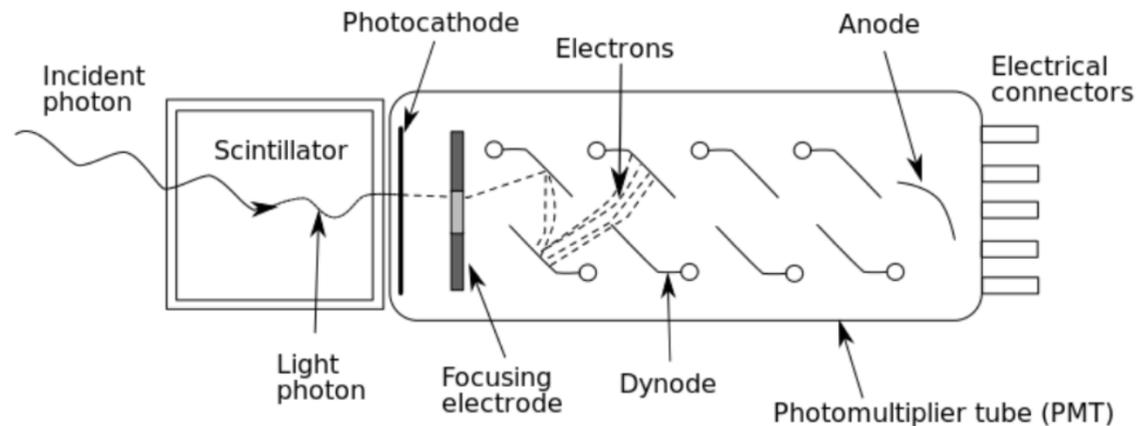
FOTOMULTIPLICADORAS

Fótons gerados por cintilador atingem fotocátodo – emissão de elétrons

Elétrons são direcionados à fotomultiplicadora e acelerados por um gradiente de tensão

Dínodos multiplicam o número de elétrons (de um a cinco por dínodo – ganho $\sim 10^6$)

Anodo coleta os elétrons no final da cadeia

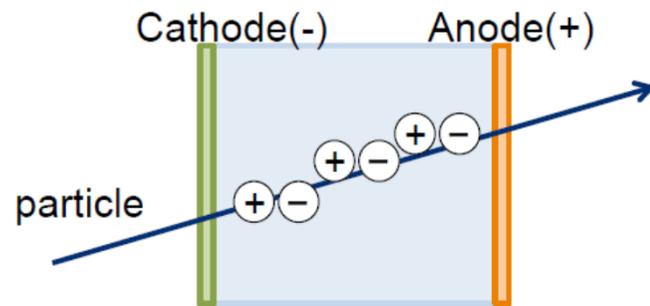


DETECTORES A GÁS

Mais tradicionais e difundidos

Formação de pares elétron-íon que dependem de características dos gases utilizados e da radiação incidente (cerca de 10 vezes menos que no Si)

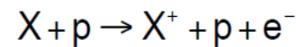
Coleta dos elétrons e dos íons positivos feita por meio de eletrodos que estabelecem campos elétricos.



Gás	Valor W (eV/par de íon)	
	Elétrons rápidos	Partículas alfa
A	26,4	26,3
He	41,3	42,7
H ₂	36,5	36,4
N ₂	34,8	36,4
Ar	33,8	35,1
O ₂	30,8	32,2
CH ₄	27,3	29,1

Diferente de energia de ionização
Leva em conta excitação e ionização

Primary ionization



Secondary ionization



p = charge particle traversing the gas
X = gas atom
e⁻ = delta-electron (δ)

if E_δ is high enough (E_δ > E_i)

DRIFT

V₊ ≈ cm/ms

V₋ ≈ cm/μs RELACIONADAS A E/P

VIDA MÉDIA DOS MÚONS

EXPERIMENTO

- CINTILADORES PLÁSTICOS HV - 2250 V E 2150 V
- 04 CINTILADORES INORGÂNICOS BaF₂ HV + 2100 V

CONCEITO 1 --- MÚONS ATRAVESSAM CINTILADOR A E PARAM EM B, NÃO GERANDO SINAL EM C. MÚONS DECAEM E ELÉTRON GERA NOVO SINAL EM B, APÓS INTERVALO DE TEMPO QUE OBEDECE A LEI DE DECAIMENTO NEUTRINOS NÃO GERAM SINAL

CONCEITO 2 --- USANDO SOMENTE B PARA DETECTAR MÚON QUE PARA E ELÉTRON DO DECAIMENTO

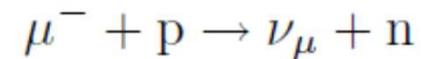
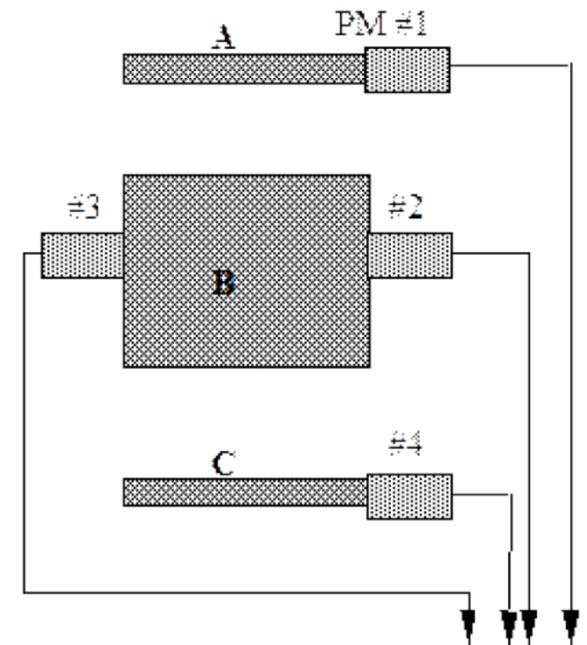
CUIDADO – MÚONS NEGATIVOS PODEM SOFRER CAPTURA NO MATERIAL ESSE PROCESSO ALTERA UM POUCO O VALOR DA VIDA MÉDIA EM RELAÇÃO AO DECAIMENTO LIVRE. NÃO CONSIDERAREMOS ESSA PEQUENA DIFERENÇA

$$I_{0,\mu^-} = 0.44I_0$$

$$I_{0,\mu^+} = 0.56I_0$$

$$I_0 = I_{0,\mu^+} + I_{0,\mu^-}$$

$$I(t) = I_0 (0,56 e^{-t/\tau_+} + 0,44 e^{-t/\tau_-}) + c$$



VIDA MÉDIA DOS MÚONS

EXPERIMENTO

PREPARAÇÃO

PESQUISANDO PERDAS DE ENERGIA NOS MATERIAIS, QUAL A ENERGIA MÁXIMA DOS MÚONS QUE PARAM EM B?

<http://pdg.lbl.gov/2015/AtomicNuclearProperties/>

QUAL A ENERGIA MÁXIMA DOS ELÉTRONS DO DECAIMENTO DOS MÚONS?

FÓRMULA EMPÍRICA PARA INTENSIDADE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO ZENITAL

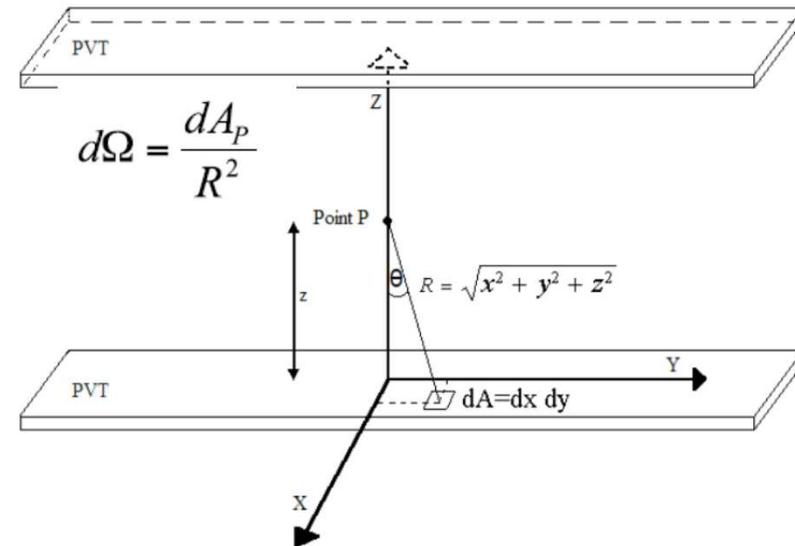
$$I(\theta) \approx I_v \cos^2 \theta \quad I_v = 0.82 \times 10^{-2} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{str}^{-1}$$

DETERMINAÇÃO DO FLUXO

- ASSUMIR QUE CADA ELEMENTO ENXERGA MESMO ÂNGULO SÓLIDO
- APROXIMAR ÁREA RETANGULAR POR CÍRCULO DE MESMA ÁREA

$$J(\theta) \approx 2\pi \int_0^\theta (I_v \cos^2 \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta = \left(\frac{\pi}{2}\right) I_v (1 - \cos^4 \theta)$$

UTILIZAR A PLANILHA EXCEL *MUON COUNT RATE ESTIMATOR* PARA ESTIMAR A TAXA DE CONTAGEM NOS DETECTORES



VIDA MÉDIA DOS MÚONS

EXPERIMENTO

PREPARAÇÃO

$$E = T + m_0 c^2$$

$$E = \gamma m_0 c^2$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$$

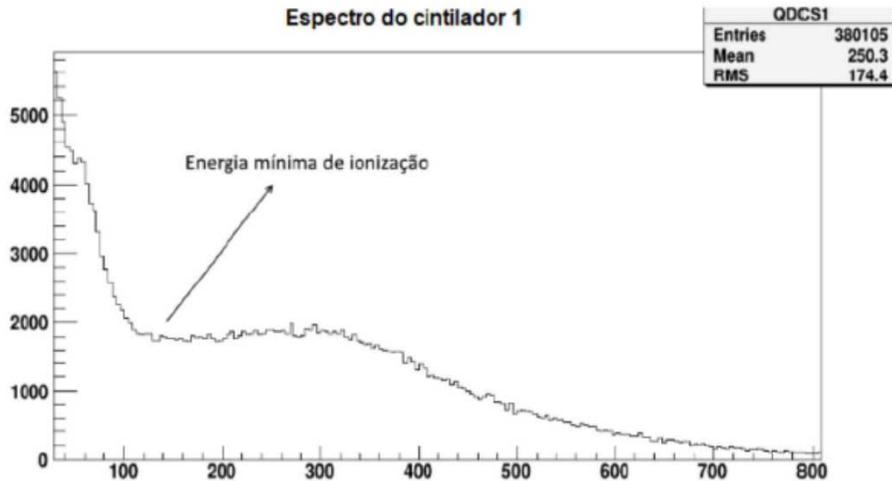
$$P = \gamma m_0 v$$

Qual a velocidade de um múon com momento $p = 120 \text{ MeV}/c$?

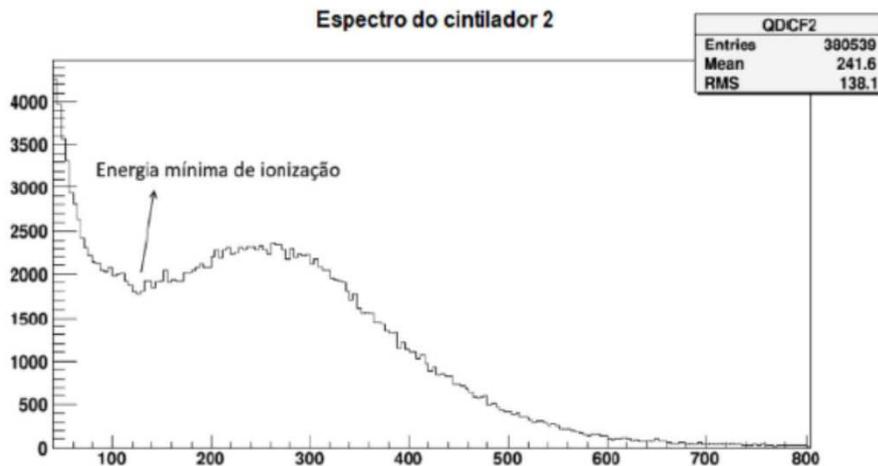
$$m_0 = 105,66 \text{ MeV}/c^2$$

ESPECTRO DOS MÚONS

Espectro do cintilador 1



Espectro do cintilador 2



Entender o que está acontecendo:

- Qual é a energia depositada para mínima ionização?
- Aproximadamente a que energia de múons corresponde o pico?
- Qual a energia típica de múons que param nos cintiladores e depois decaem? Em que região do espectro aparecem?
- Qual a máxima energia dos elétrons provenientes do decaimento dos múons?

VIDA MÉDIA DOS MÚONS

EXPERIMENTO

PREPARAÇÃO

TAXA DE EVENTOS ACIDENTAIS

FUNÇÃO DISTRIBUIÇÃO PARA INTERVALO DE TEMPO ENTRE EVENTOS ALEATÓRIOS ADJACENTES COM TAXAS r_A E r_B

PRIMEIRO EVENTO (START) OCORRE EM $t = 0$

PROBABILIDADE DIFERENCIAL DE O PRÓXIMO EVENTO (STOP) OCORRER EM INTERVALO DIFERENCIAL dt APÓS DECORRIDO INTERVALO t É O PRODUTO DA PROBABILIDADE $P(0)$ DE NÃO SE OBSERVAR EVENTOS NO INTERVALO DE 0 A t , PELA PROBABILIDADE DE UM EVENTO NO INTERVALO dt

NÚMERO MÉDIO DE EVENTOS DE 0 A $t = r_B t$

DISTRIBUIÇÃO DE POISSON

$$P(x) = \frac{\bar{x}^x e^{-\bar{x}}}{x!}$$

$$P(0) = \frac{(rt)^0 e^{-rt}}{0!}$$

$I(t)dt = e^{-r_B t} r_B dt$. LOGO, A TAXA DIFERENCIAL TOTAL É $dR/dt = r_A r_B e^{-r_B t}$ $r_A =$ TAXA DE START
AQUI $r_B t$ SERÁ PEQUENO E EXPONENCIAL ~ 1 .

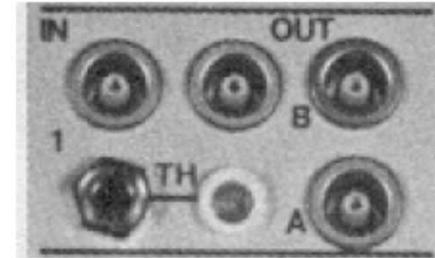
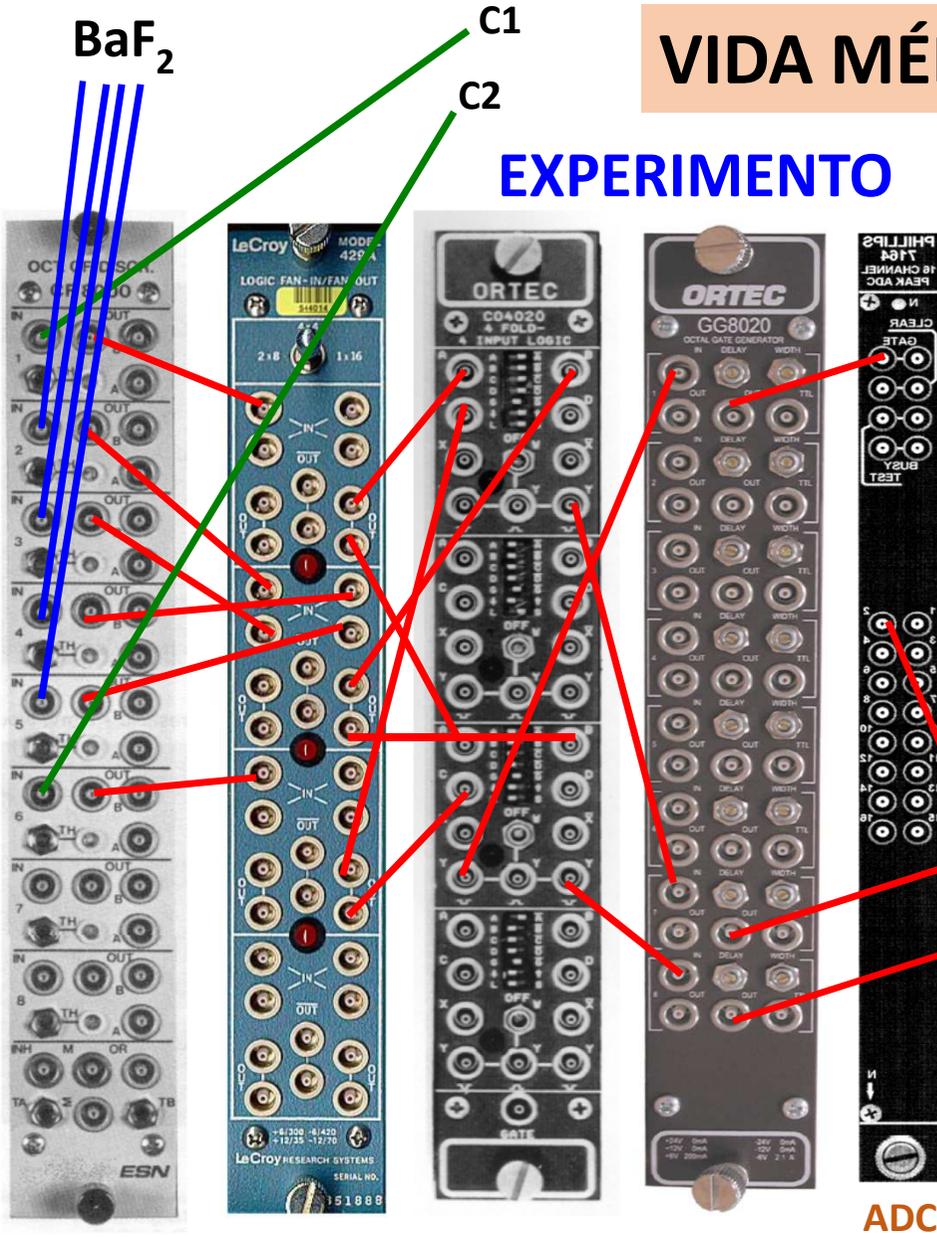
PORTANTO, A TAXA DE EVENTOS ACIDENTAIS SERÁ DADA POR $\tau_{AC} = r_A r_B \Delta T$

$\Delta T =$ janela do TAC

VIDA MÉDIA DOS MÚONS (1)

EXPERIMENTO

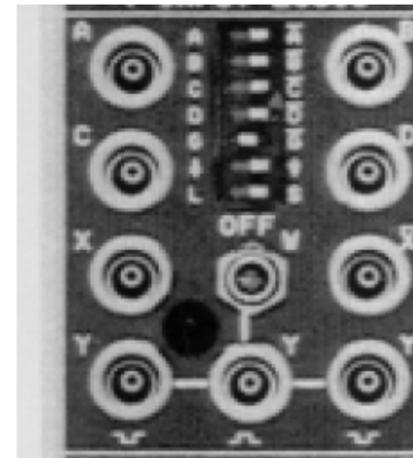
ELETRÔNICA



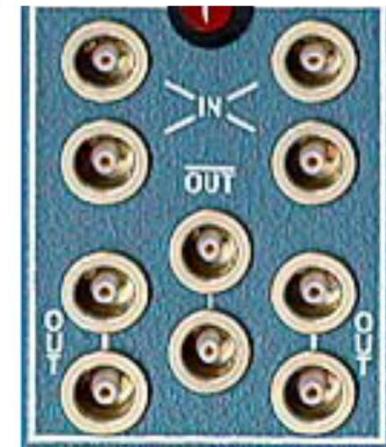
CONSTANT FRACTION DISCRIMINATOR



GATE AND DELAY GENERATOR



LOGIC UNIT



LOGIC FAN IN FAN OUT

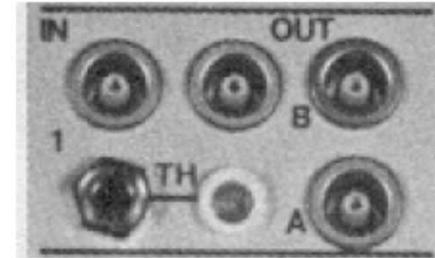
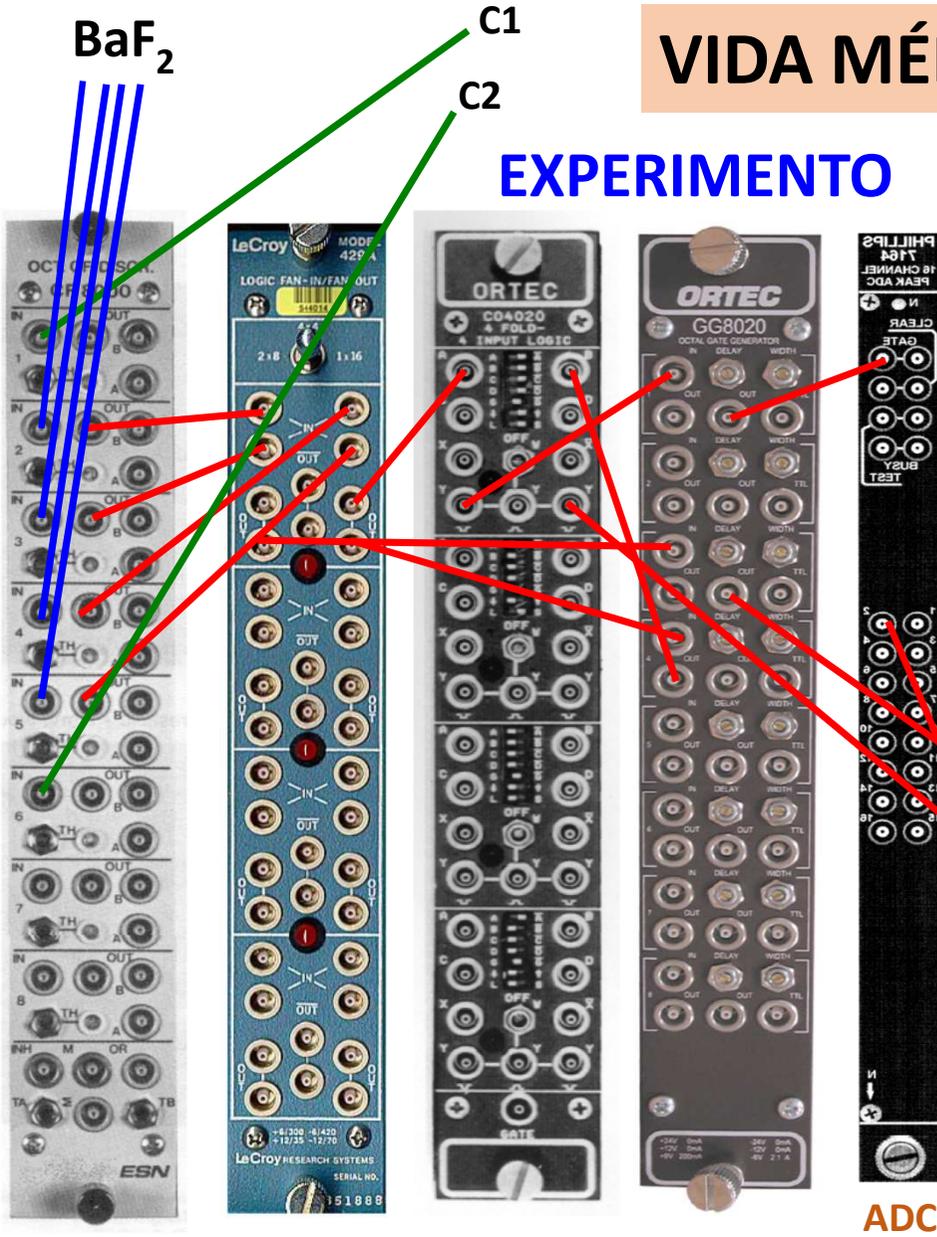


TIME TO AMPLITUDE CONVERTER

VIDA MÉDIA DOS MÚONS (2)

EXPERIMENTO

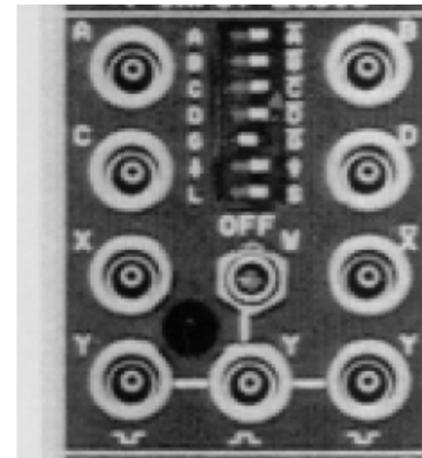
ELETRÔNICA



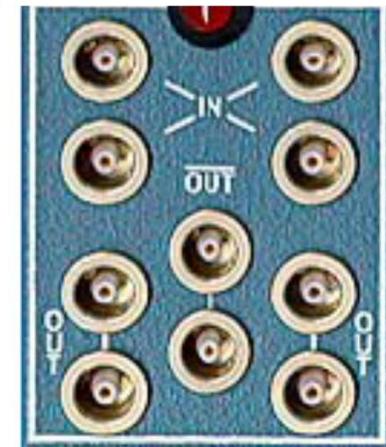
CONSTANT FRACTION DISCRIMINATOR



GATE AND DELAY GENERATOR



LOGIC UNIT



LOGIC FAN IN FAN OUT



TIME TO AMPLITUDE CONVERTER

VIDA MÉDIA DOS MÚONS (1)

EXPERIMENTO

ELETRÔNICA

SAÍDA CFD --- LARGURA 200 ns

SAÍDA LOGIC UNIT --- LARGURA 200 ns

SAÍDA GDG START $A \cdot B \cdot \bar{C}$ --- LARGURA 250 ns

SAÍDA GDG STOP $\bar{A} \cdot B \cdot \bar{C}$ --- LARGURA 250 ns

SAÍDA GDG GATE AQUISIÇÃO --- LARGURA 4 μ s

COM PULSADOR

- Verificar simultaneidade de A, B e C
- Testar as lógicas de start e stop
- Variar atraso entre start e stop e verificar saída do TAC
- Ajustar timing entre gate e sinal do TAC

VIDA MÉDIA DOS MÚONS (1)

EXPERIMENTO

ELETRÔNICA

CONCEITO 1

- GERAR LÓGICA

$A \cdot B \cdot \bar{C}$ -- START

$\bar{A} \cdot B \cdot \bar{C}$ -- STOP

AJUSTE DE DISCRIMINADORES É IMPORTANTE

AJUSTAR DISCRIMINADORES

A --- 90 mV

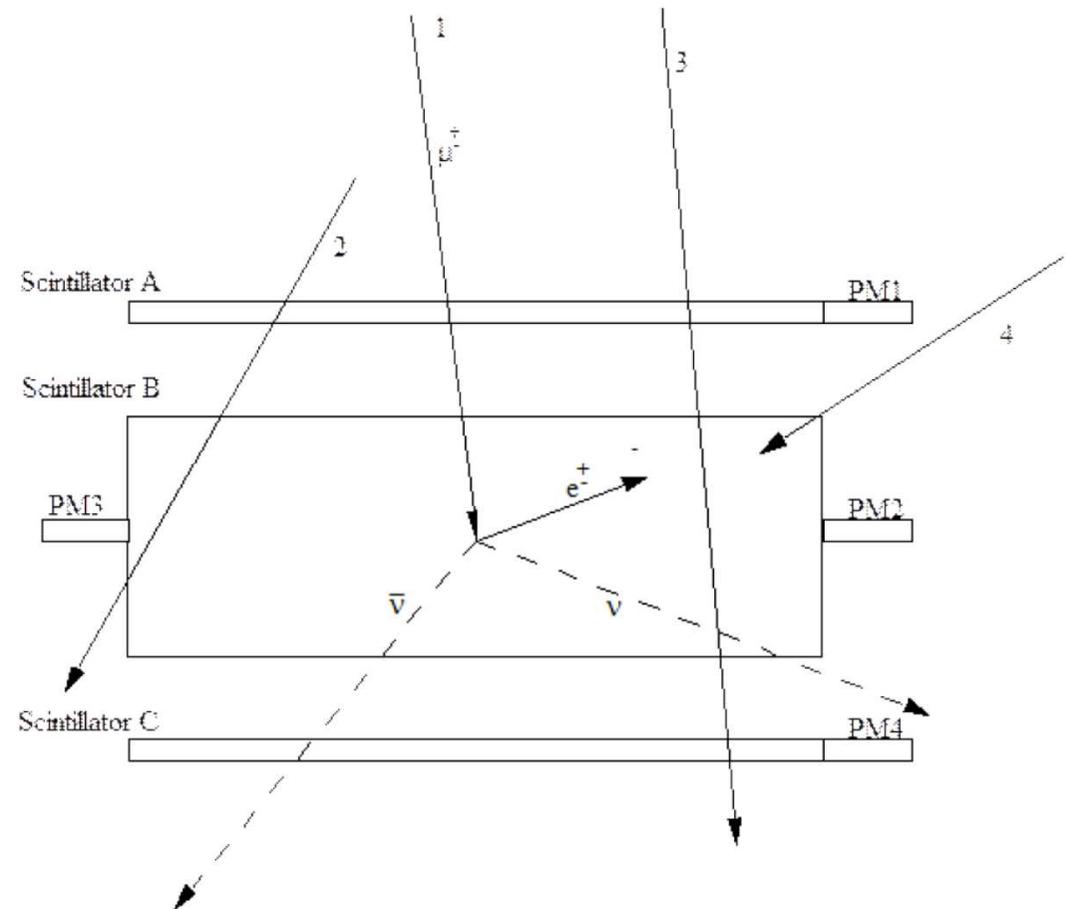
B --- 180 mV

C --- 200 mV

FUNDO DE ESCALA TAC ---- 10 μ s

CALIBRAÇÃO DE TEMPO COM PULSADOR E GATE AND DELAY GENERATOR

DETERMINAR ns/canal

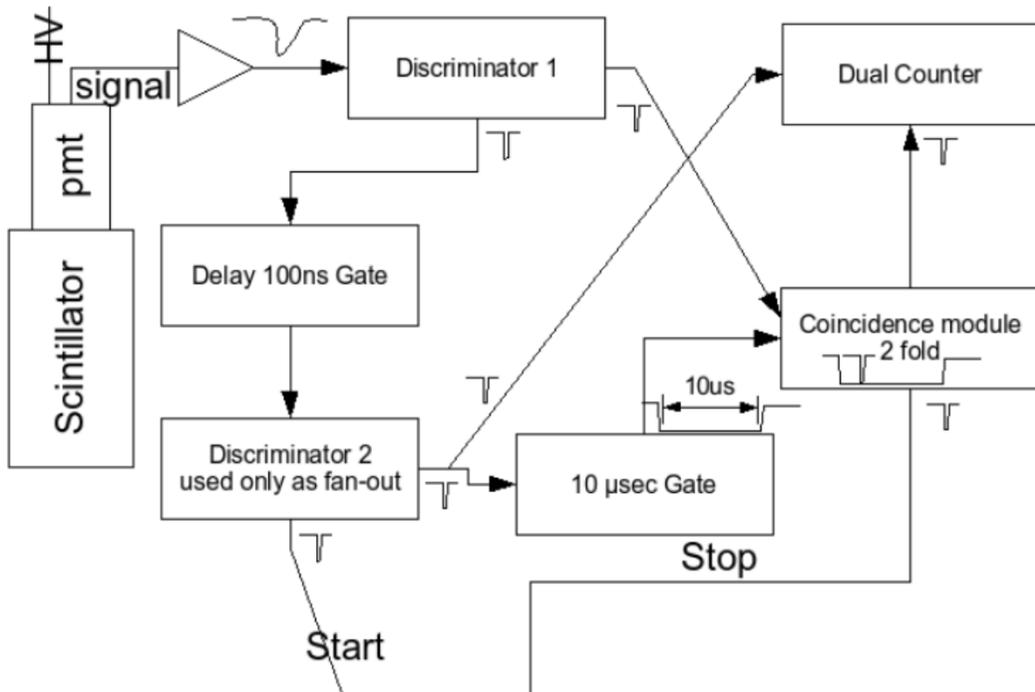


VIDA MÉDIA DOS MÚONS (2)

EXPERIMENTO

ELETRÔNICA

CONCEITO 2



FUNDO DE ESCALA TAC ---- 10 μ s

CALIBRAÇÃO DE TEMPO COM PULSADOR E GATE AND DELAY GENERATOR

DETERMINAR ns /canal

VIDA MÉDIA DOS MÚONS

EXPERIMENTO

RESULTADOS

- AJUSTAR A ELETRÔNICA COM PULSADOR
- TOMAR DADOS PARA **CONCEITO 2** POR PELO MENOS 72 h. MONITORAR TOMADA DE DADOS E SALVAR RUN A CADA 12 HORAS (**não zerar histograma**). Fazer escalação antes do início da tomada de dados
- EFETUAR CALIBRAÇÃO EM TEMPO (PULSADOR) NO FINAL
- EFETUAR AJUSTE ADEQUADO PARA DETERMINAR τ E A RESPECTIVA INCERTEZA
- MEDIR COM SCALER A TAXA DE EVENTOS ACIDENTAIS E COMPARAR O NÚMERO DE ACIDENTAIS COM O OBTIDO NO AJUSTE (explicar que tipo de evento estaria contribuindo)