

# Instrumentação para Física de partículas

Alberto Reis

## IV - Detectores de estado sólido

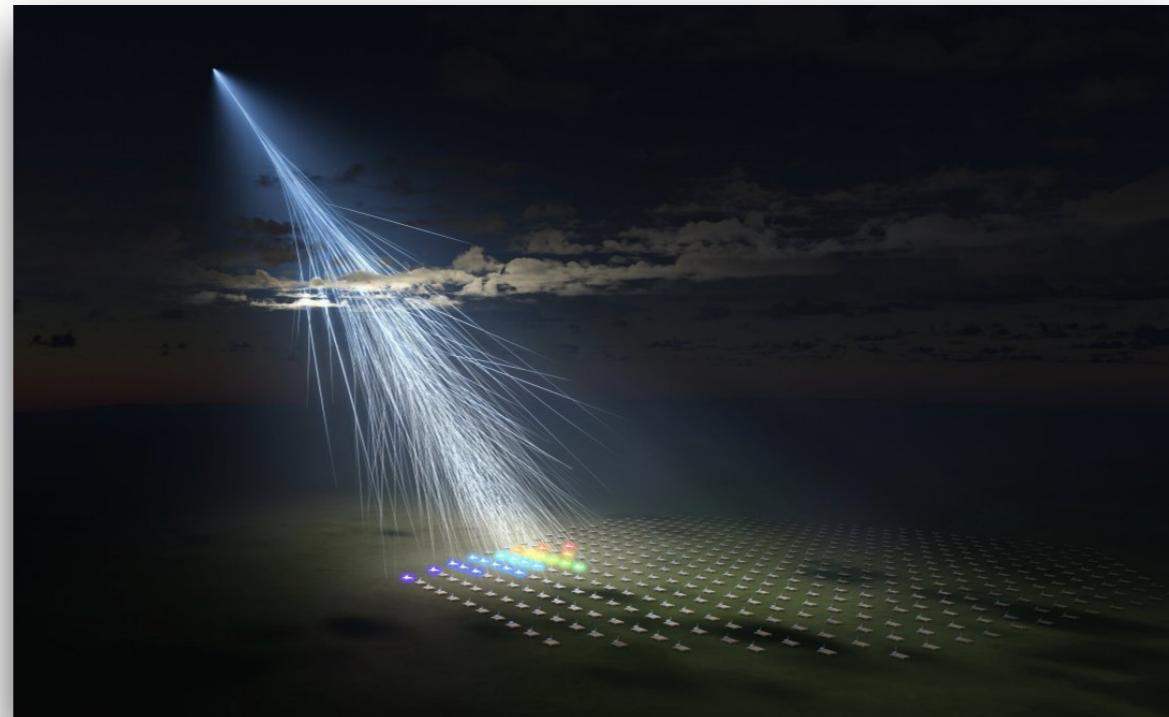


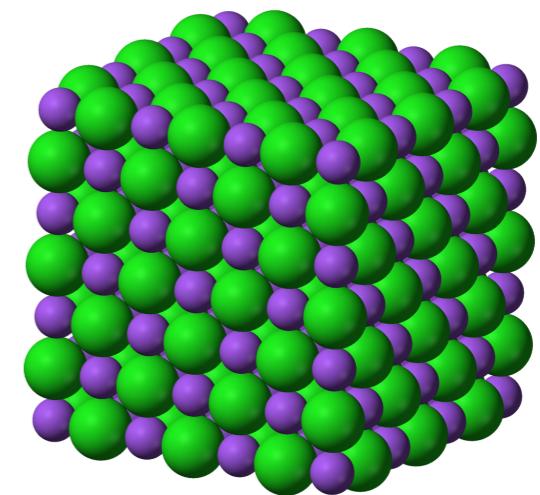
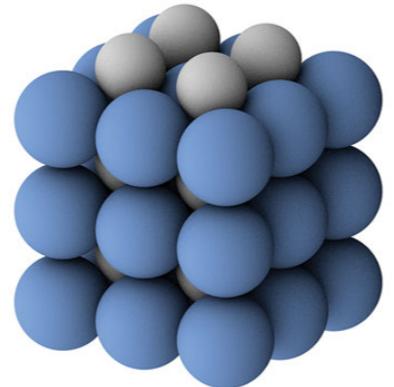
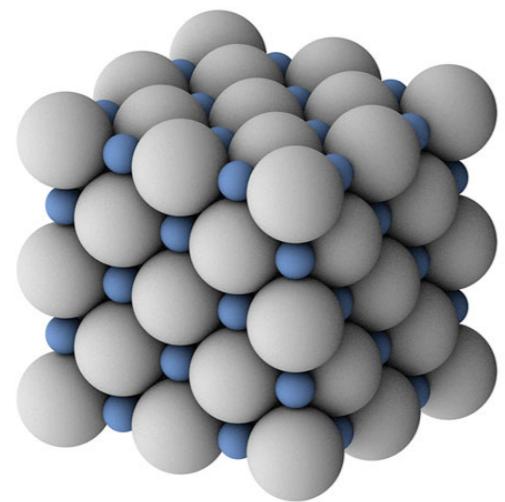
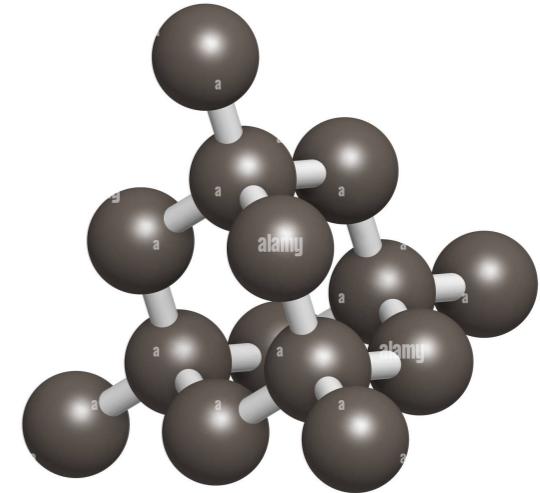
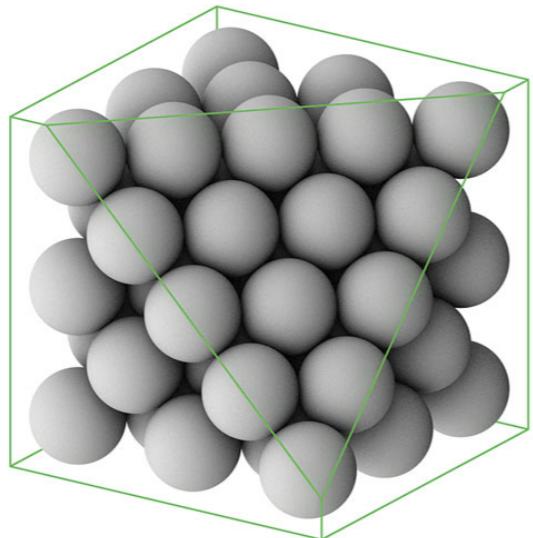
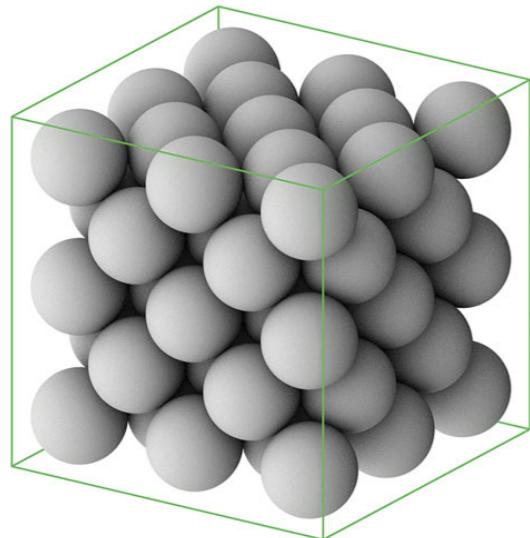
Imagen: Tyuunosuke Tajkeshige



## DISPOSITIVOS DE ESTADO SÓLIDO PARA DETECÇÃO DE FÓTONS

- \* Como nos gases, a passagem de radiação ionizante (fótons, partículas carregadas) em sólidos produz ionização: pares elétron-“buraco”
- \* Nos semicondutores, a energia necessária para ionização é 10x menor que nos gases → melhor resolução de energia
- \* Em certos materiais, uma pequena fração da energia transferida pela radiação incidente causa excitação molecular, que resulta na emissão de fótons de energia relativamente baixa → cintilação
- \* Fótons de cintilação podem ser detectados por detectores de silício ou por tubos fotomultiplicadores (PMTs)
- \* Os detectores de fótons transformam luz em corrente elétrica. Nas PMTs, via efeito fotoelétrico; nos detectores de silício, via ionização

# Redes cristalinas

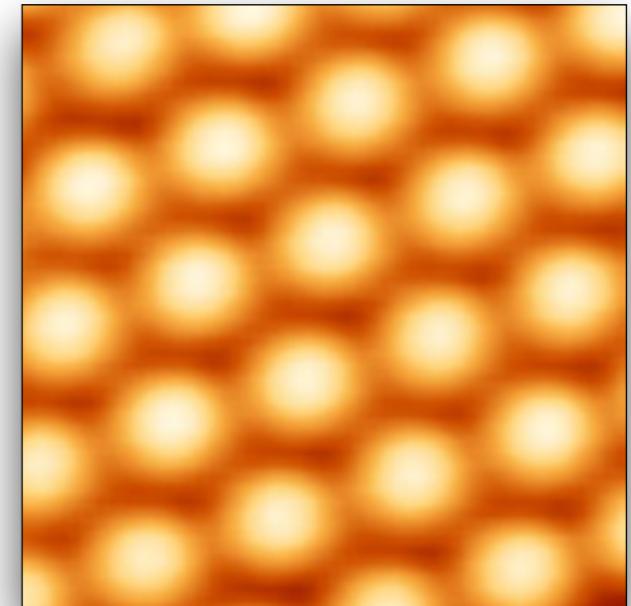


- ★ Em sólidos, a energia necessária para ionização é 10x menor que em gases

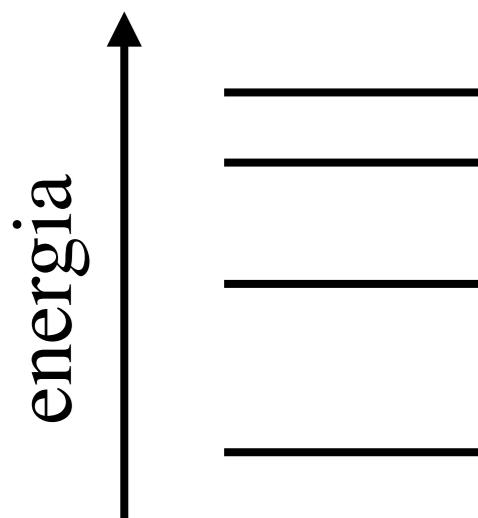
- ★ maior densidade permite o uso de detectores de menor dimensão

Em átomos isolados, elétrons têm níveis de energia discretos

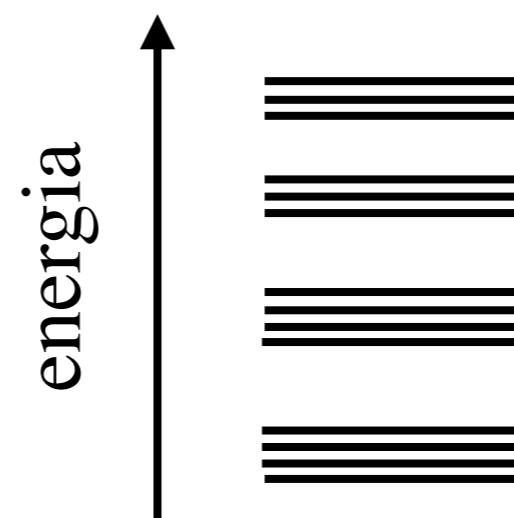
Nas redes cristalinas, a distância entre dois átomos é da mesma ordem que as suas dimensões: alguns Å ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ )



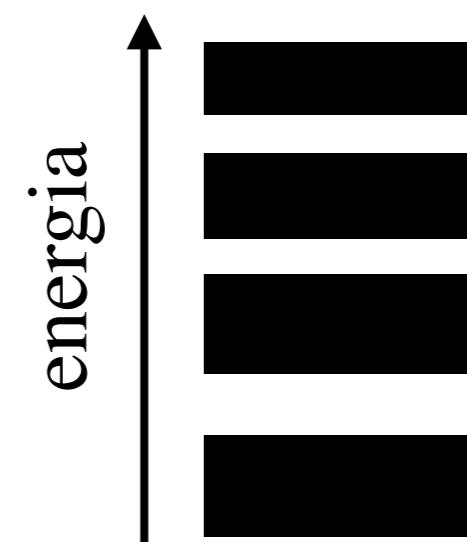
Nas redes cristalinas os orbitais atômicos se superpõem. Os níveis de energia dos elétrons se fundem, formando bandas quase contínuas. (diferenças entre dois níveis em uma banda são da ordem de  $10^{-20} \text{ eV}$ )



átomo isolado

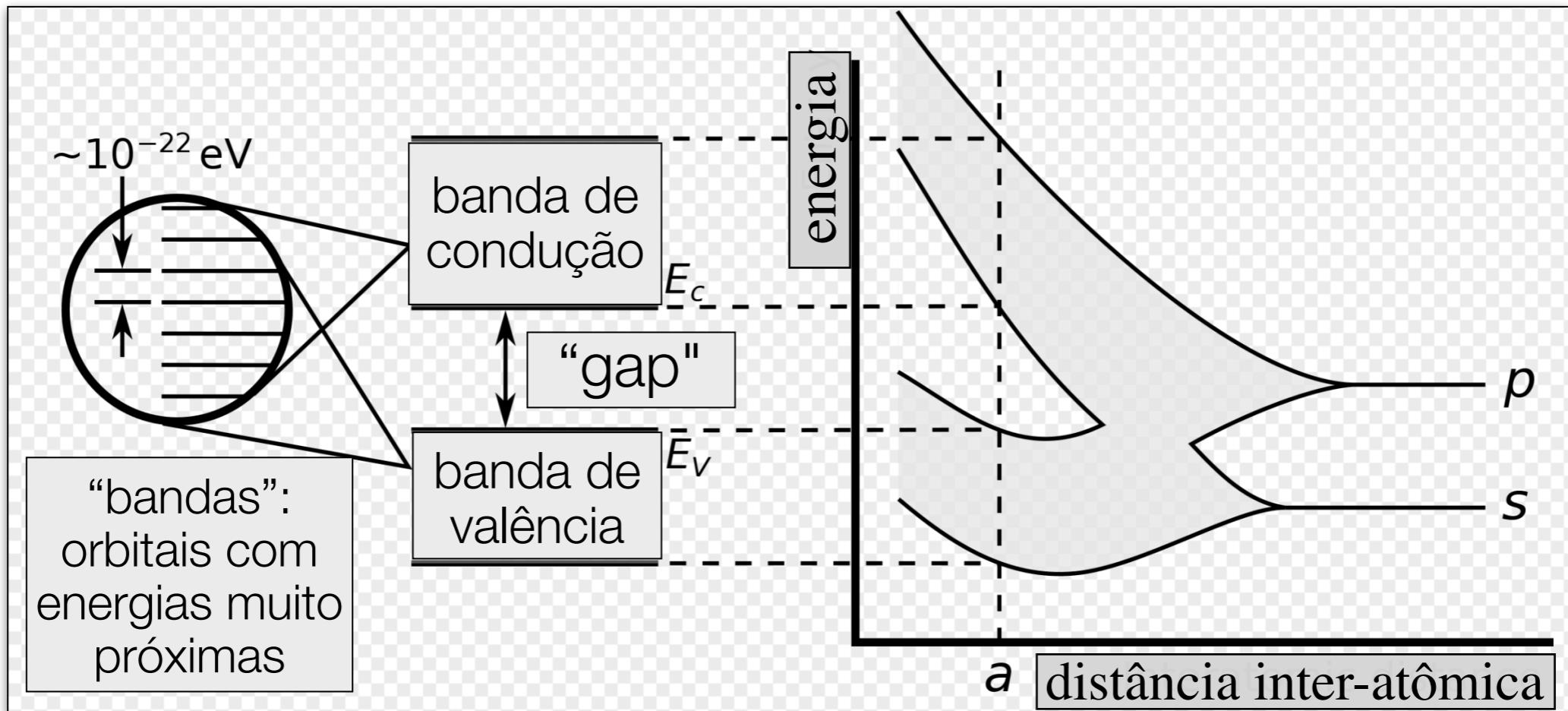


alguns átomos próximos



rede cristalina

[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Metals\\_and\\_insulators,\\_quantum\\_difference\\_from\\_band\\_structure.ogv](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Metals_and_insulators,_quantum_difference_from_band_structure.ogv)



orbitais totalmente preenchidos

banda de condução

$\updownarrow \sim 9$  eV

banda de valência

isolante

orbitais parcialmente preenchidos

banda de condução

$\updownarrow \sim 1$  eV

banda de valência

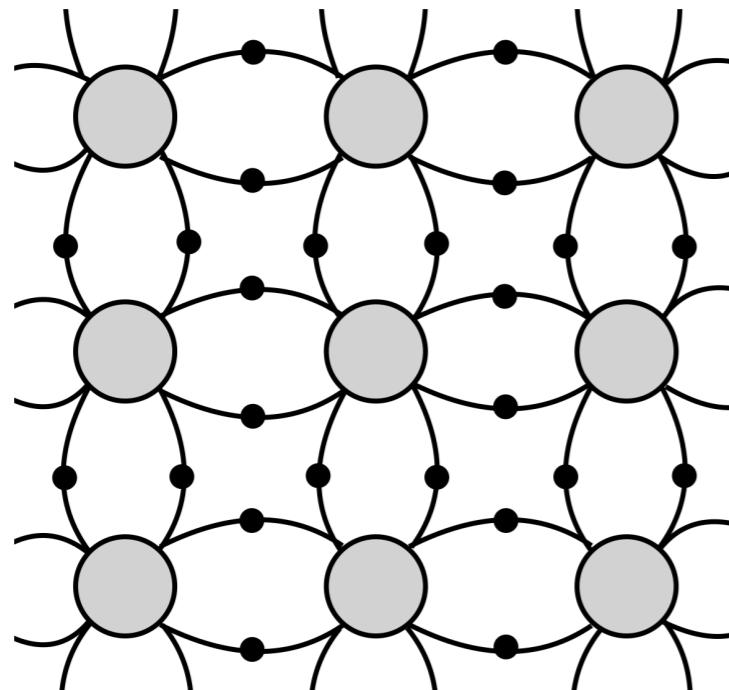
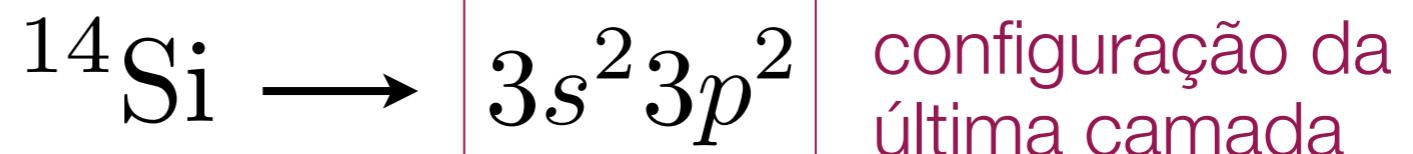
semicondutor

orbitais parcialmente preenchidos, bandas se superpõem

banda de condução

banda de valência

condutor

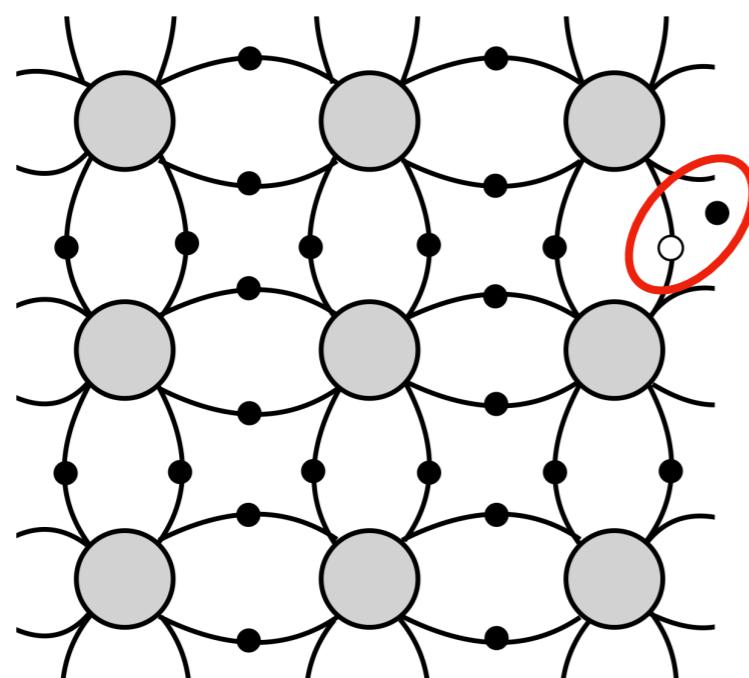


Em T = 0K, todos os elétrons participam da ligação covalente

banda de condução

~ 1 eV

banda de valência



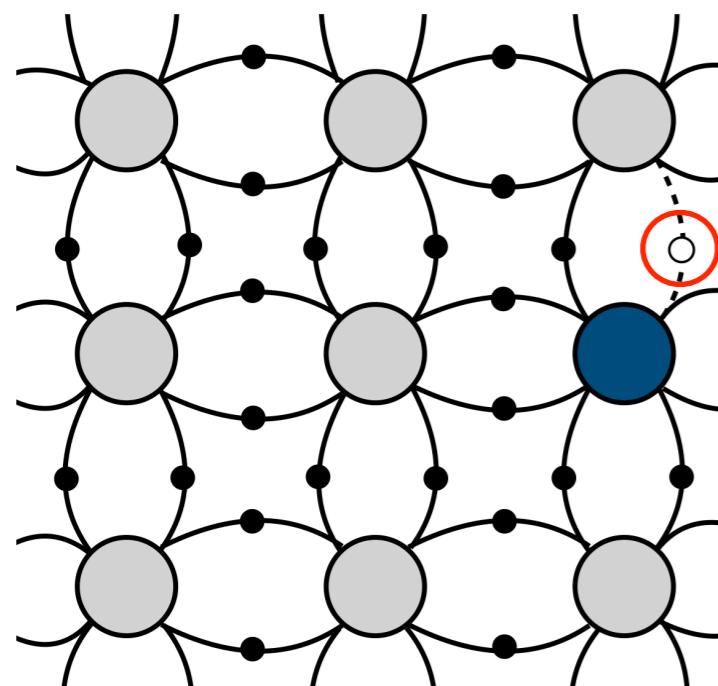
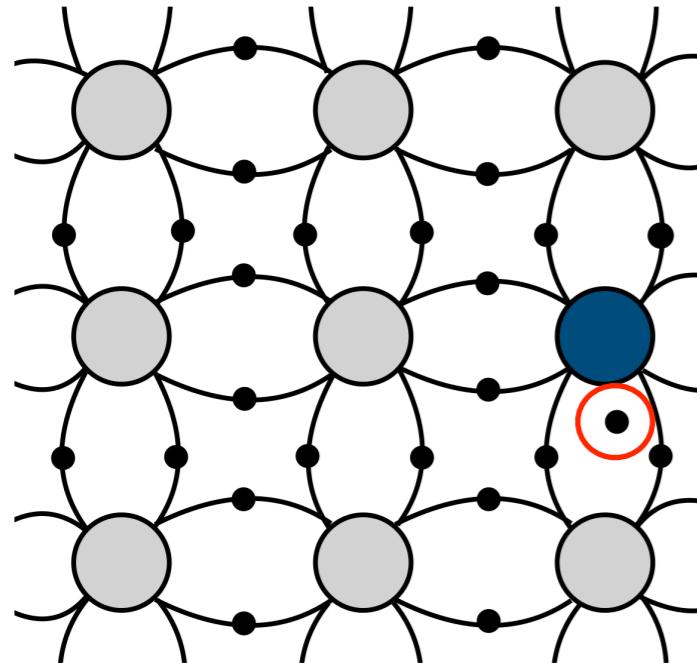
Em T = 300K, algumas ligações são rompidas, deixando “buracos” na banda de valência e elétrons “livres”

banda de condução

~ 1 eV

banda de valência

A adição de pequenas quantidades de impurezas (dopagem) aumenta significativamente o número de portadores de carga

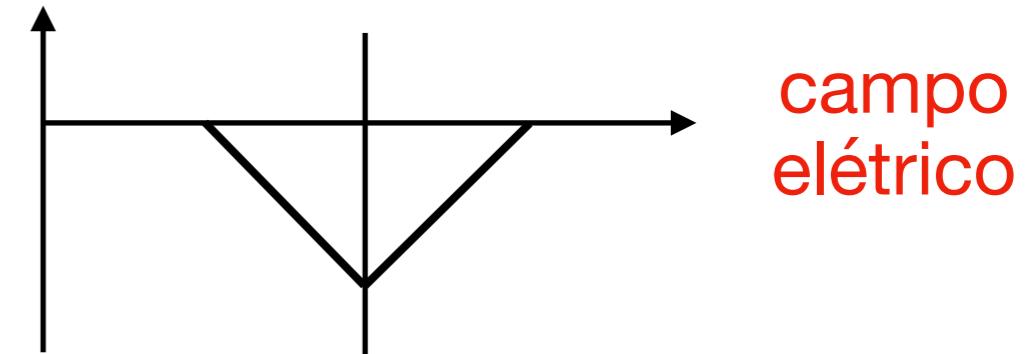
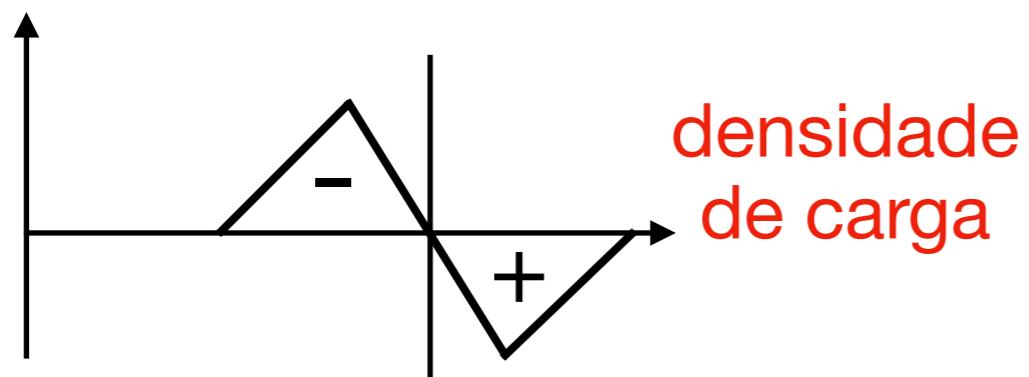
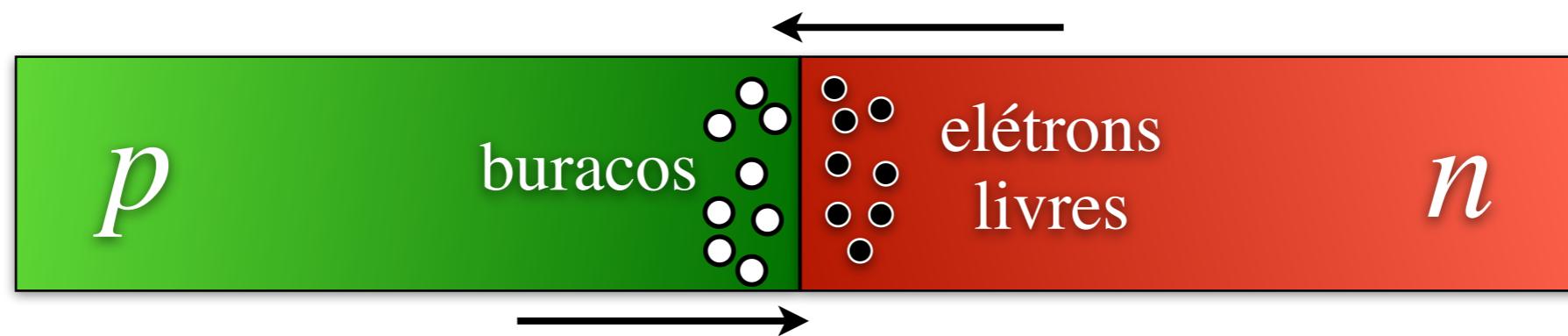


# Junção pn

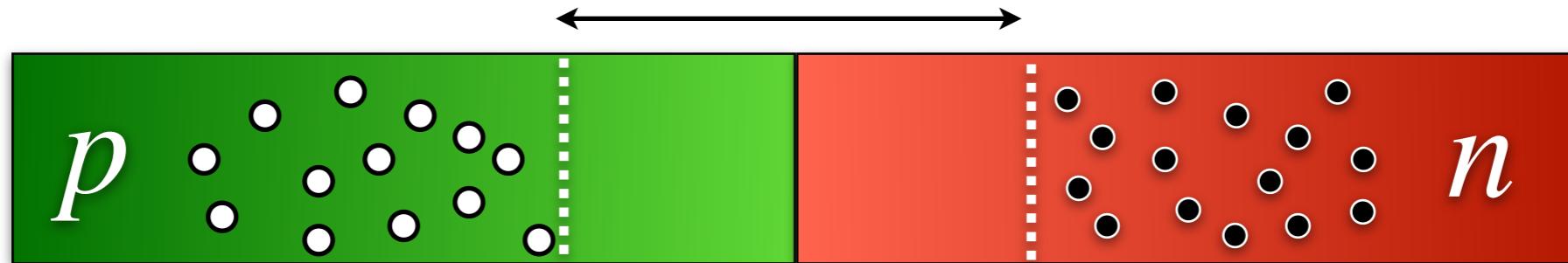
A condução elétrica em semicondutores é feita pelos *portadores de carga (elétrons e buracos) introduzidos pela dopagem*

- densidade de portadores em silício não dopado:  $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  @ 300 K
- densidade de portadores em silício dopado:  $\sim 10^{18-20} \text{ cm}^{-3}$  @ 300 K

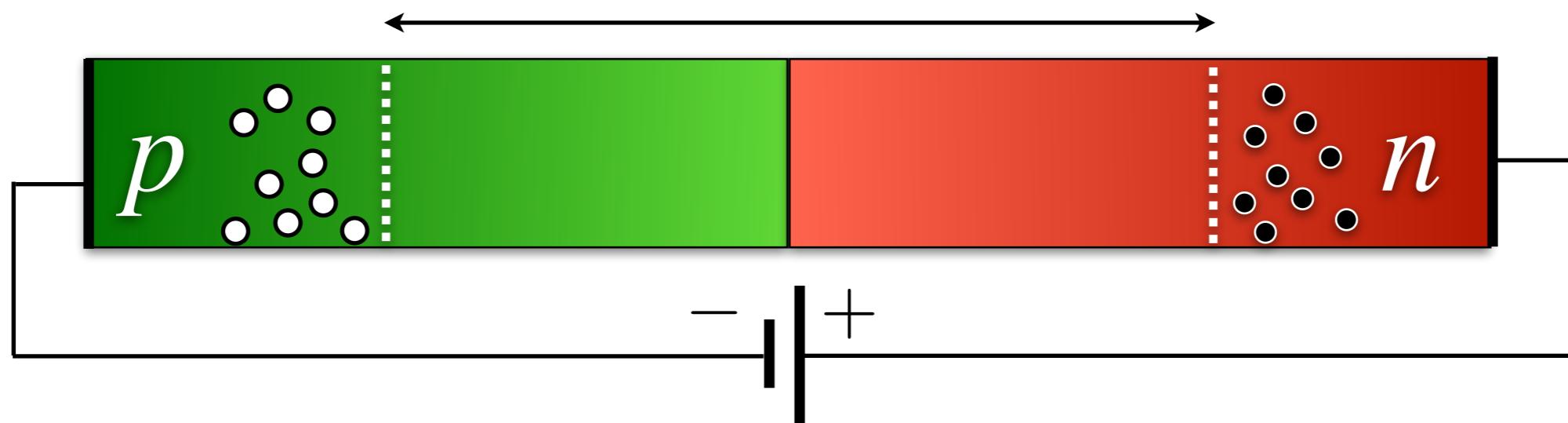
Todos os detectores feitos com semicondutores dependem da **junção pn**  
na junção, elétrons migram para a região *p*, deixando buracos em *n*



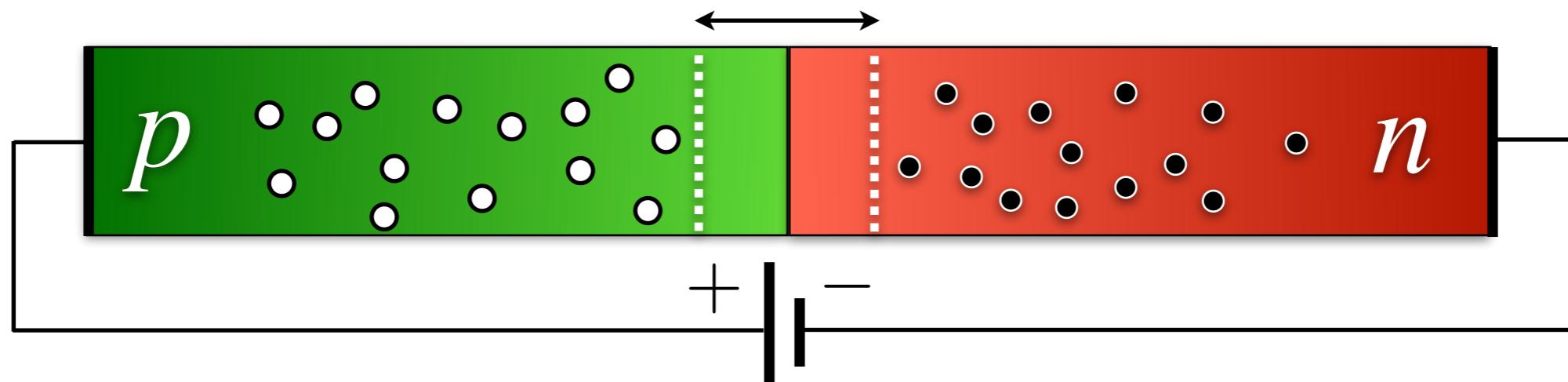
zona sem cargas livres (*depletion layer*)



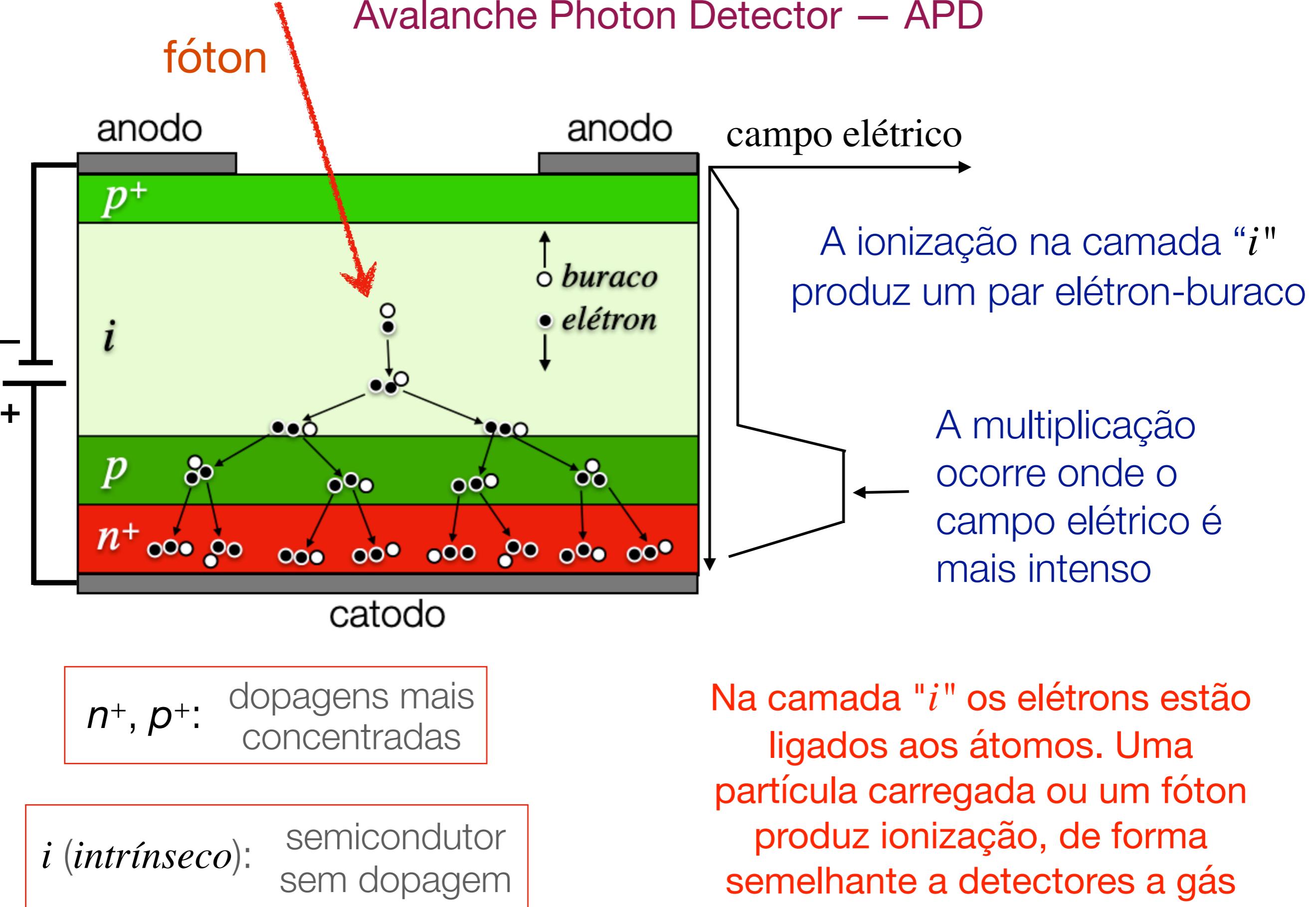
*"reverse bias"*: aumenta a zona sem cargas livres



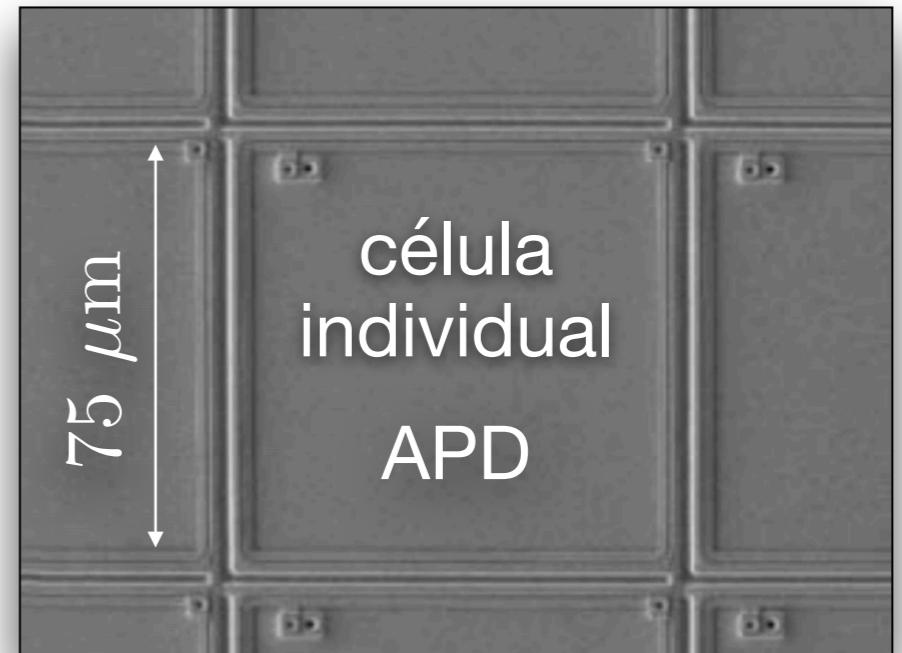
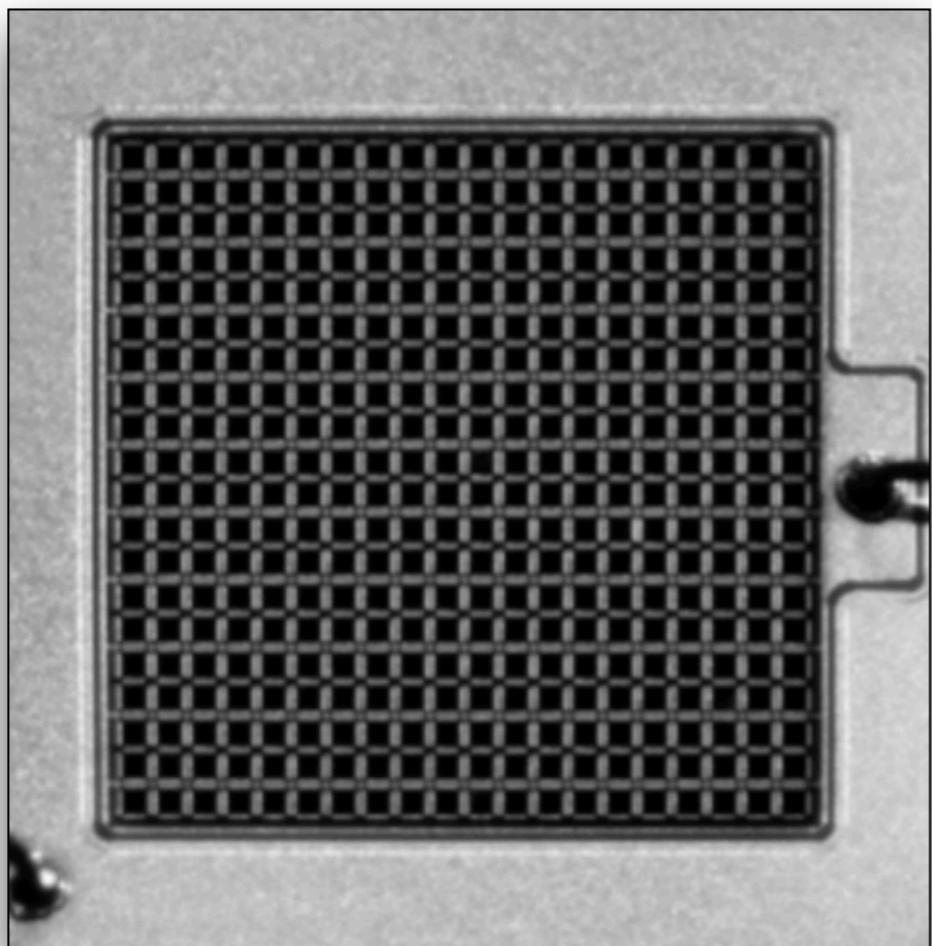
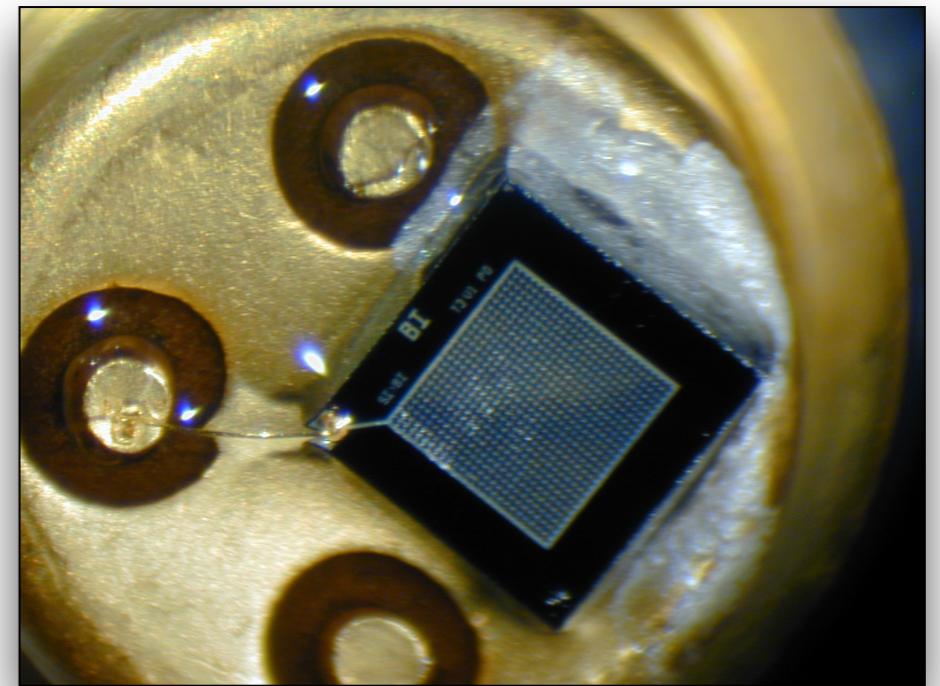
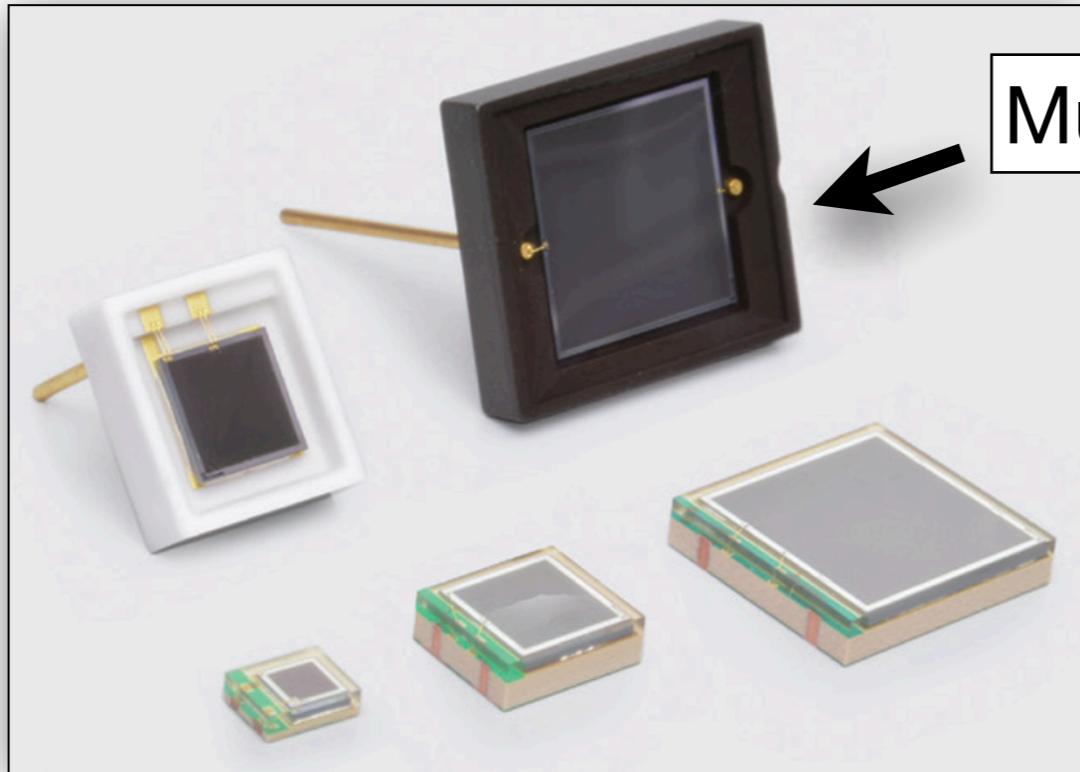
*"forward bias"*: reduz a zona sem cargas livres

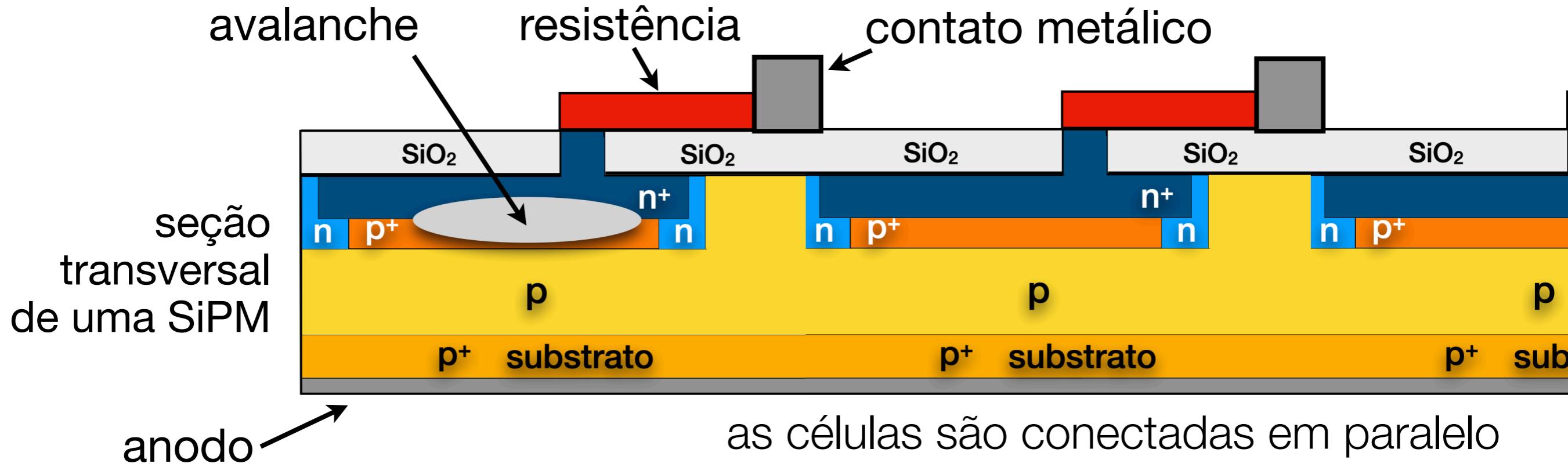


# Avalanche Photon Detector — APD

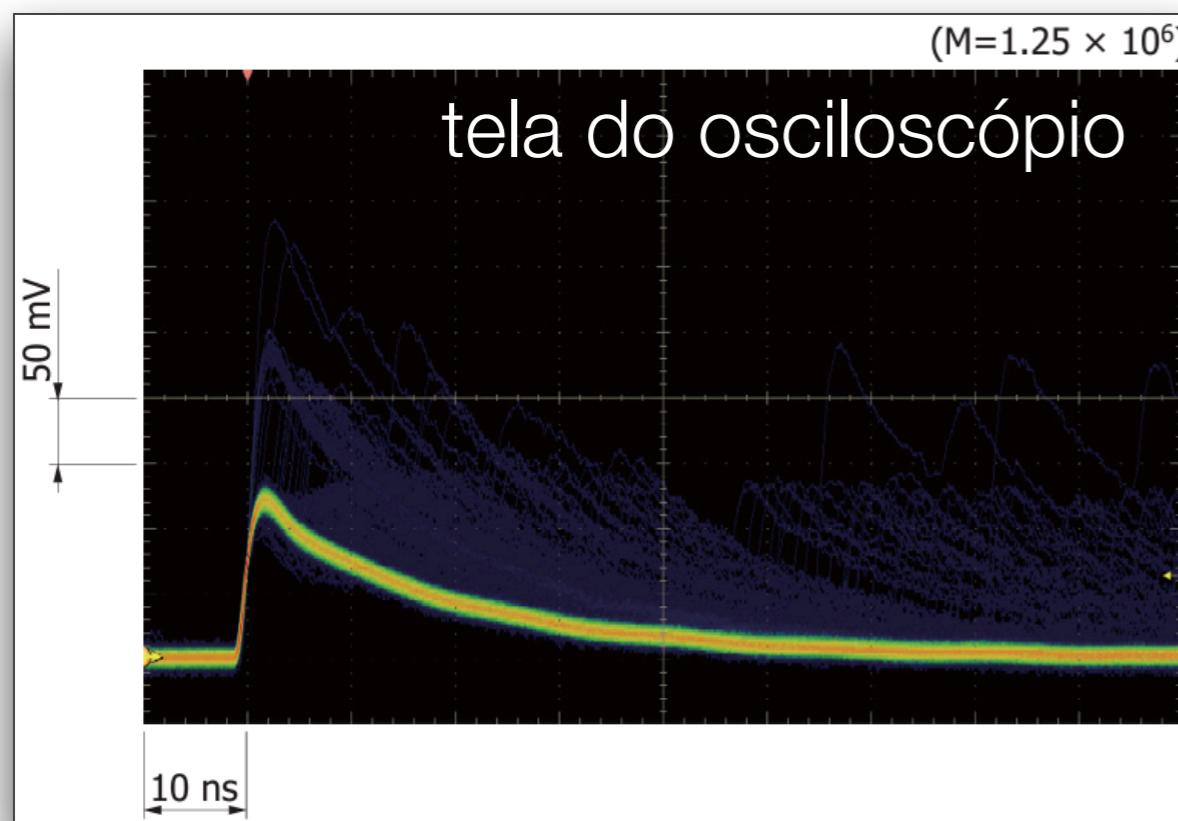


## Multi-Pixel Photon Counter - MPPC

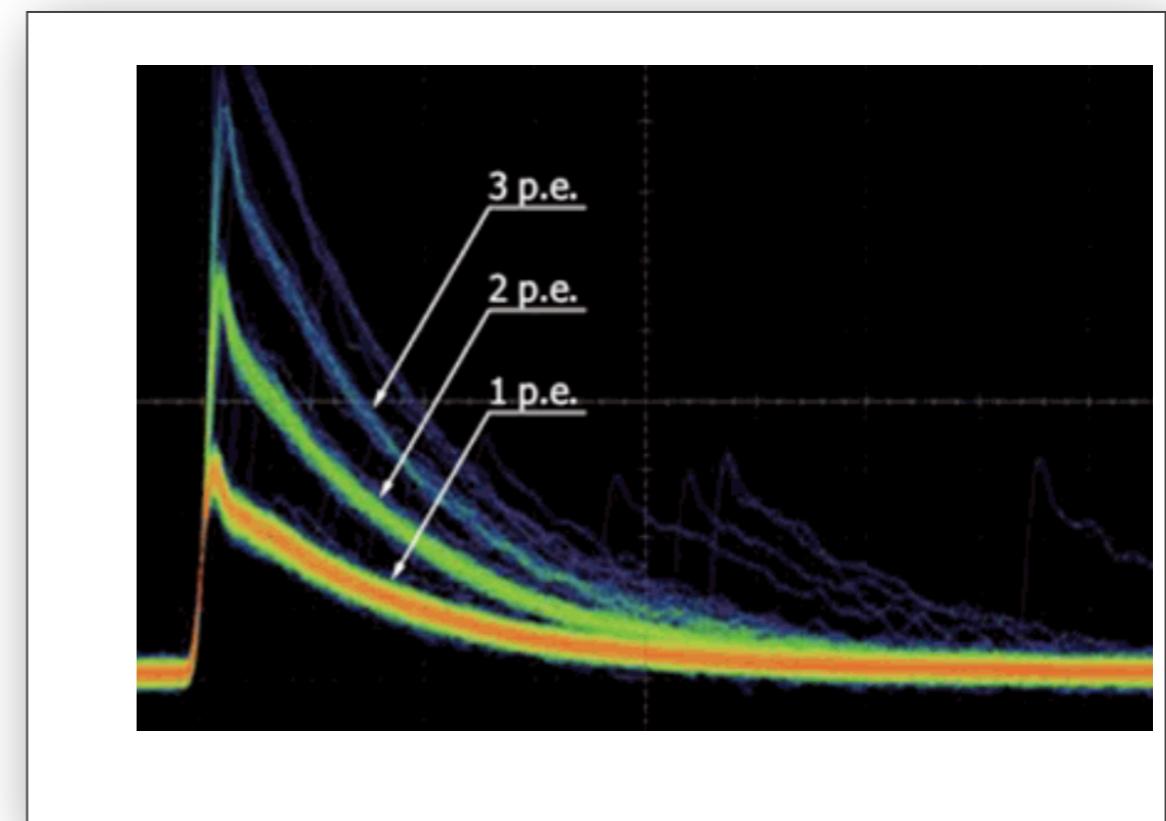


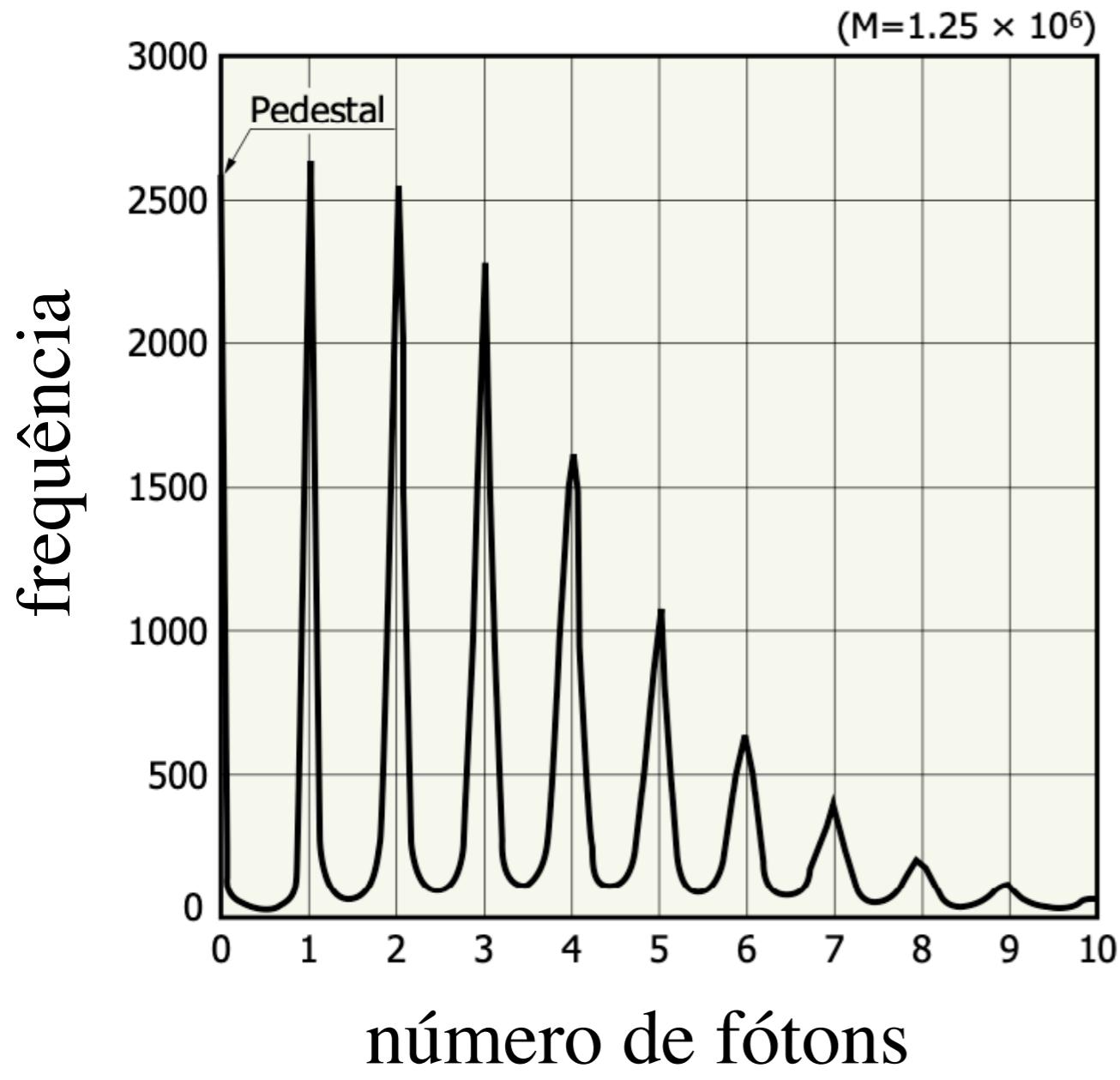


SiPM: detectam um único fóton...

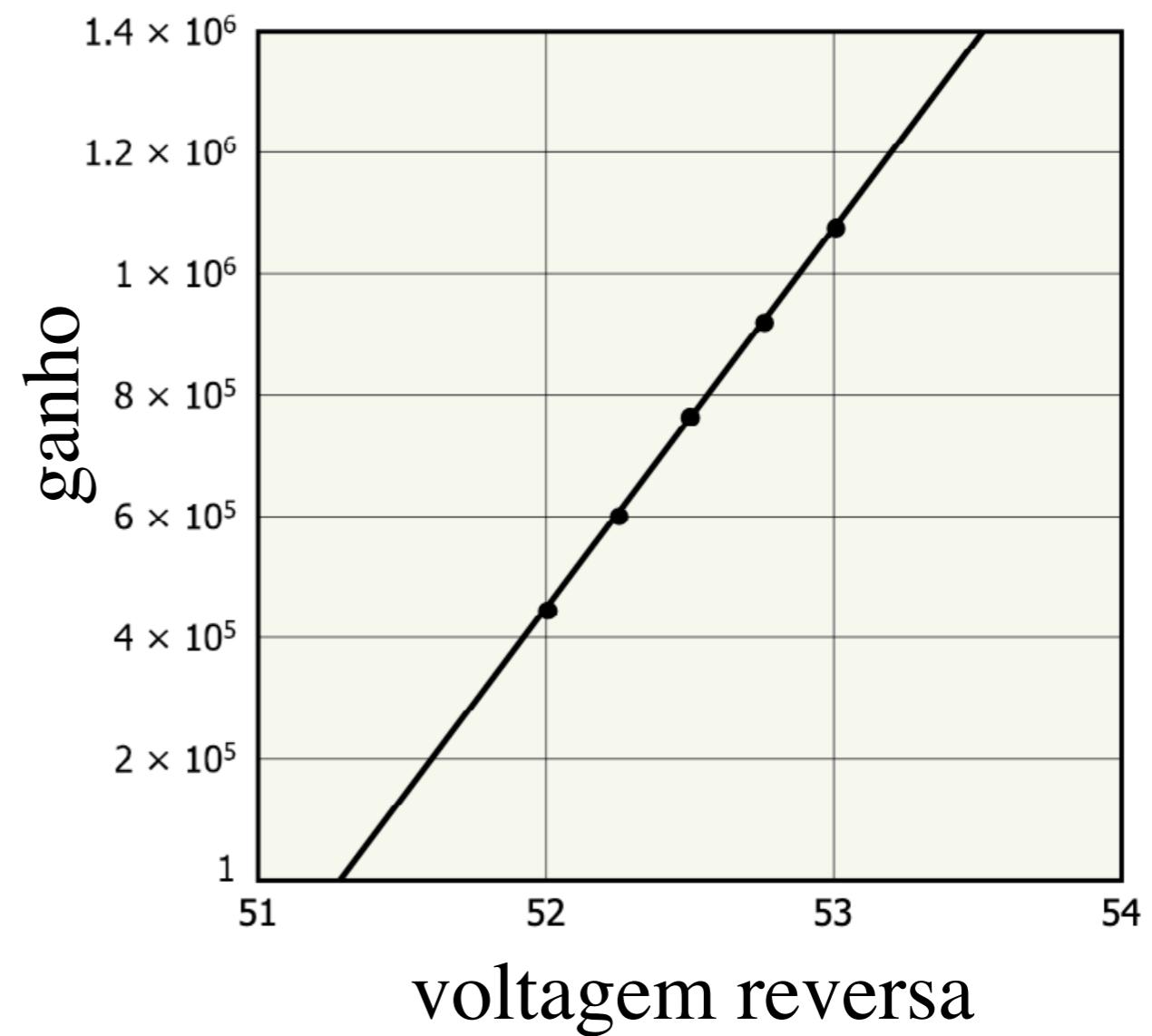


...ou vários fótons





um exemplo da performance  
de um detector MPPC



# Cintiladores

A cintilação é um processo físico pelo qual alguns tipos de material – cintiladores – emitem radiação UV quando excitados pela passagem de partículas carregadas ou fótons energéticos

- ❖ dois tipos de cintiladores:

inorgânicos { mais fótons,  
reposta +lenta

orgânicos { menos fótons,  
reposta +rápida

- ❖ principais características:

**eficiência quântica**

eficiência na transformação da energia depositada pela radiação em luz

**linearidade**

intensidade da luz proporcional à energia depositada

**rapidez**

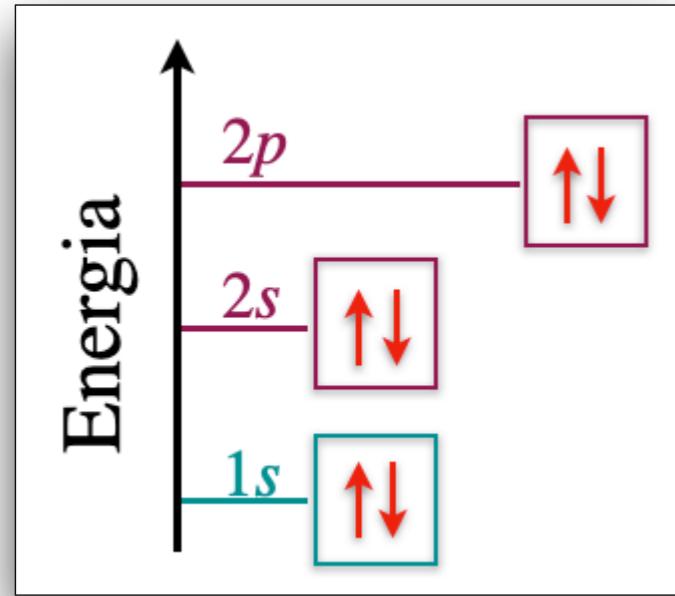
resposta rápida ( $\sim 10^{-8}$  s),  
tempo morto pequeno

**transparência**

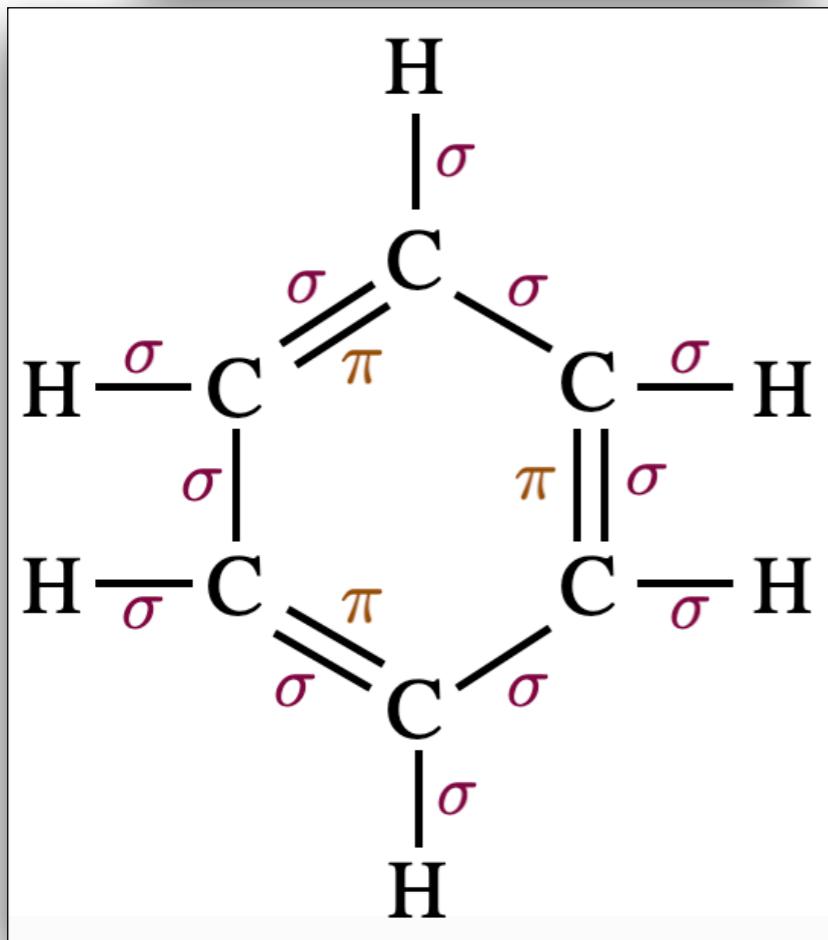
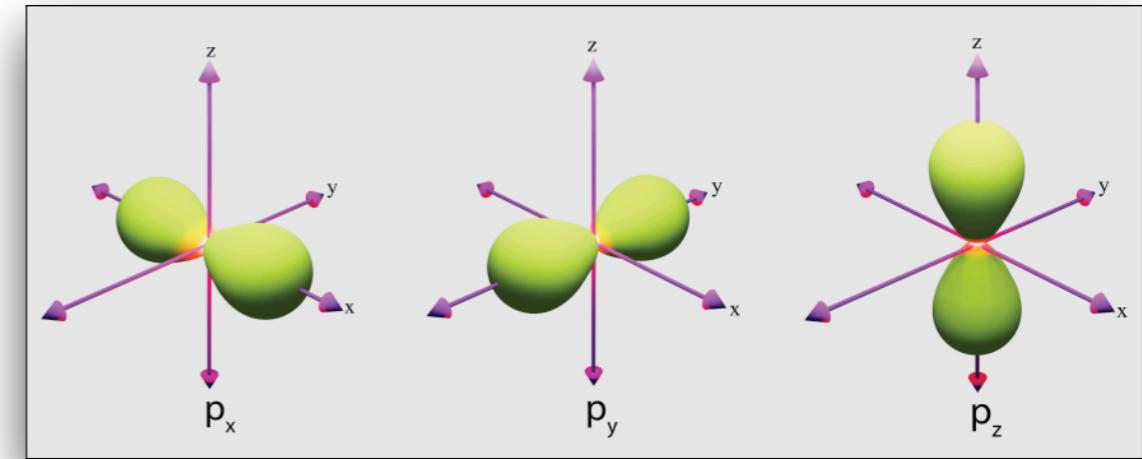
o material deve ser transparente à própria luz

# Orbitais moleculares - benzeno

configuração eletrônica do carbono

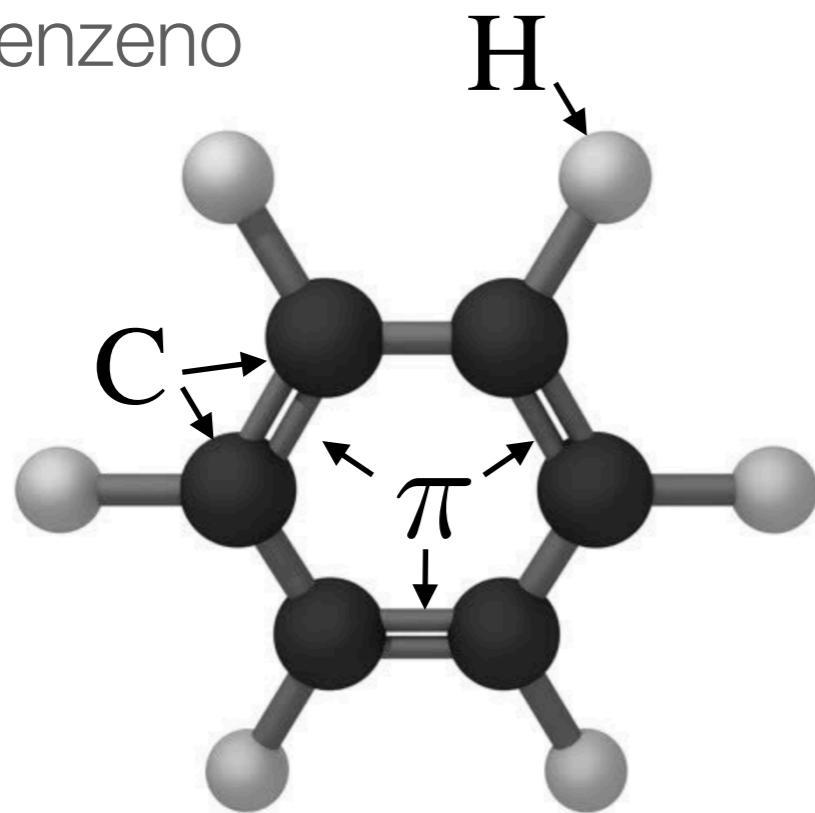


orbitais  $p$

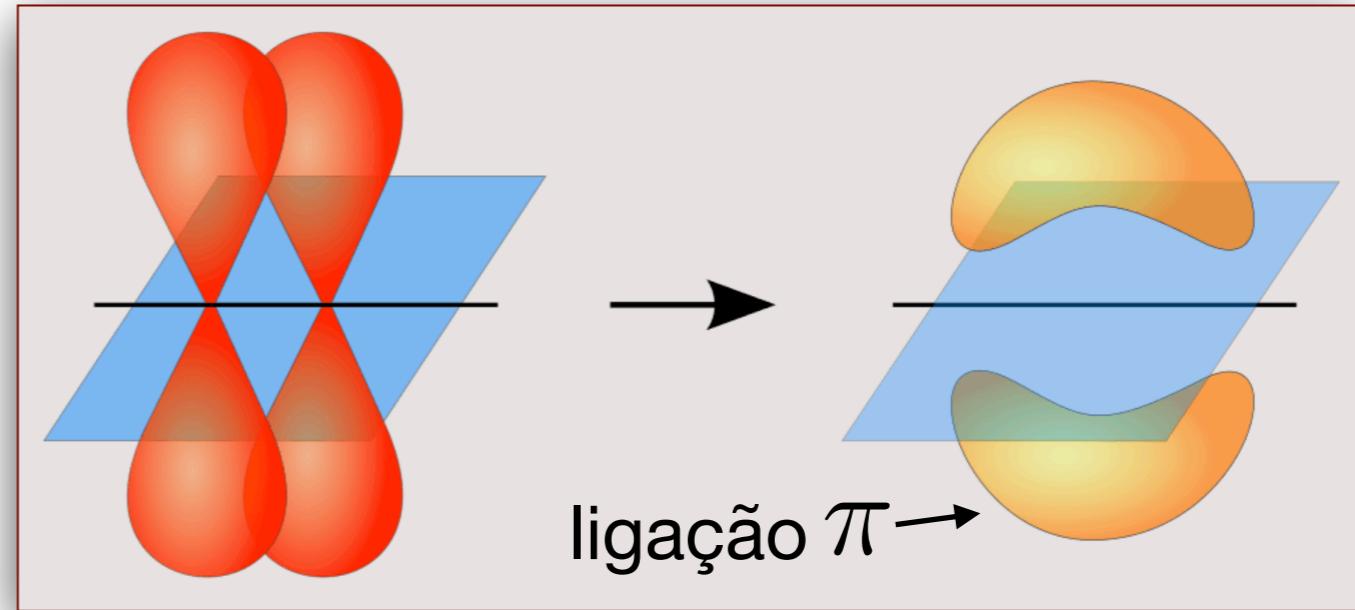


- três dos quatro elétrons na última camada formam orbitais  $sp^2$  híbridos: ligação  $\sigma$  (no plano do hexágono)
- o quarto elétron da última camada forma um orbital híbrido  $p_z$  ligação  $\pi$  (perpendicular ao hexágono)
- elétrons das ligações  $\pi$  não estão ligados a nenhum átomo específico

molécula  
de benzeno

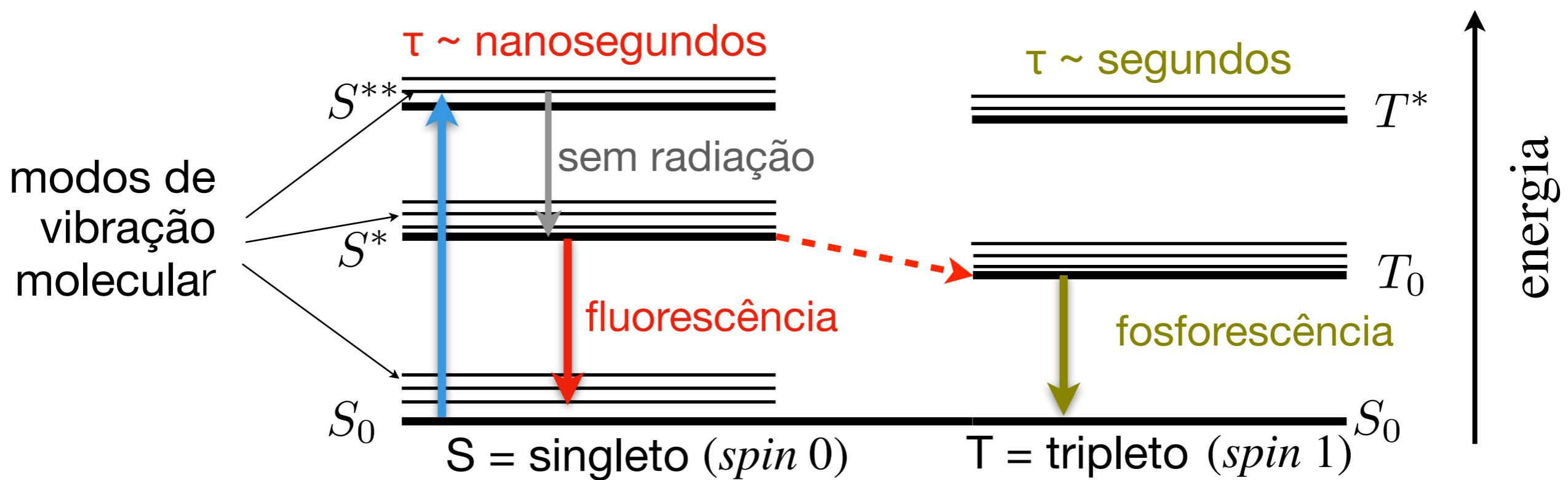


orbitais *p* de dois  
átomos de carbono  
se fundem,

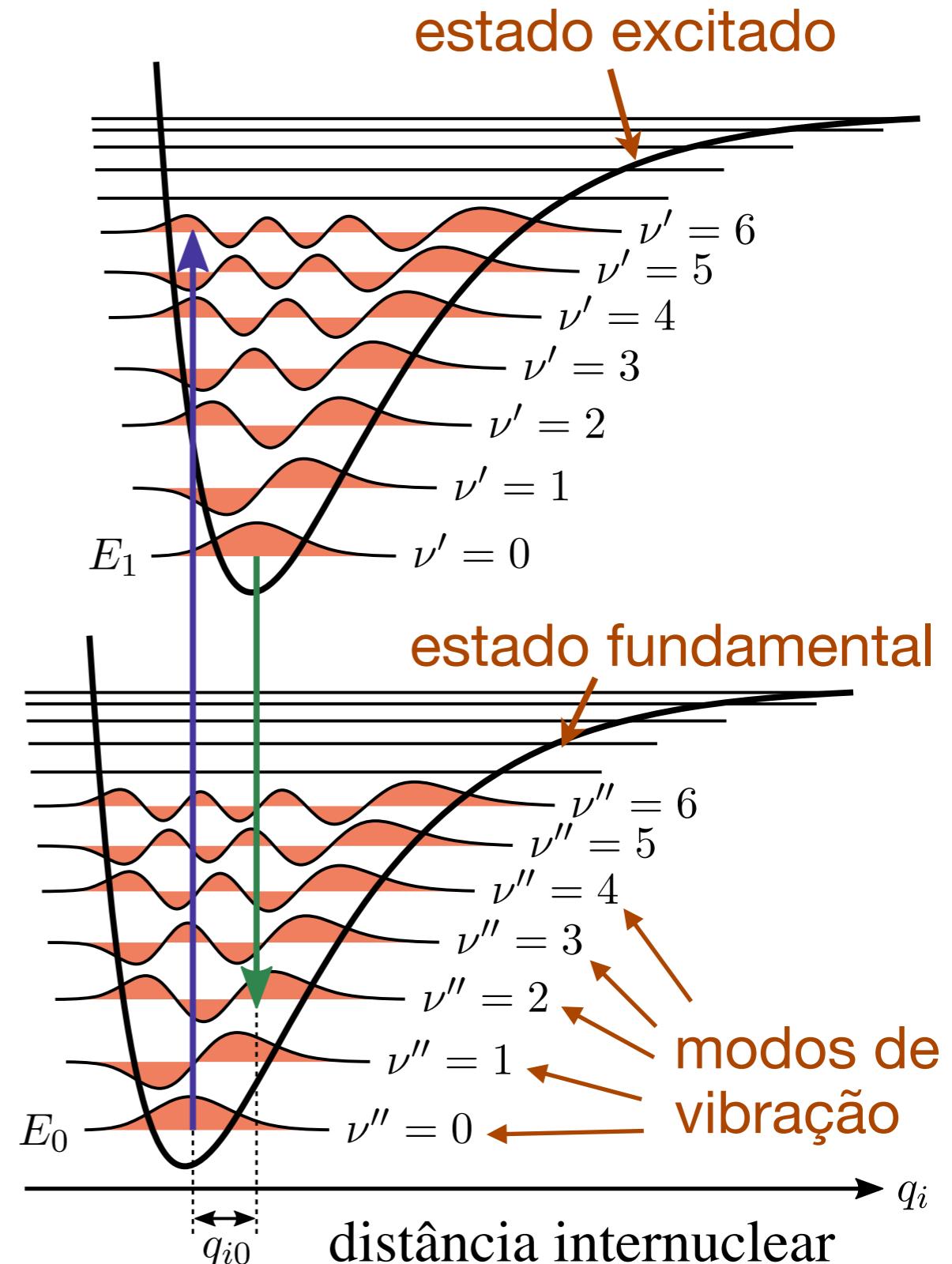
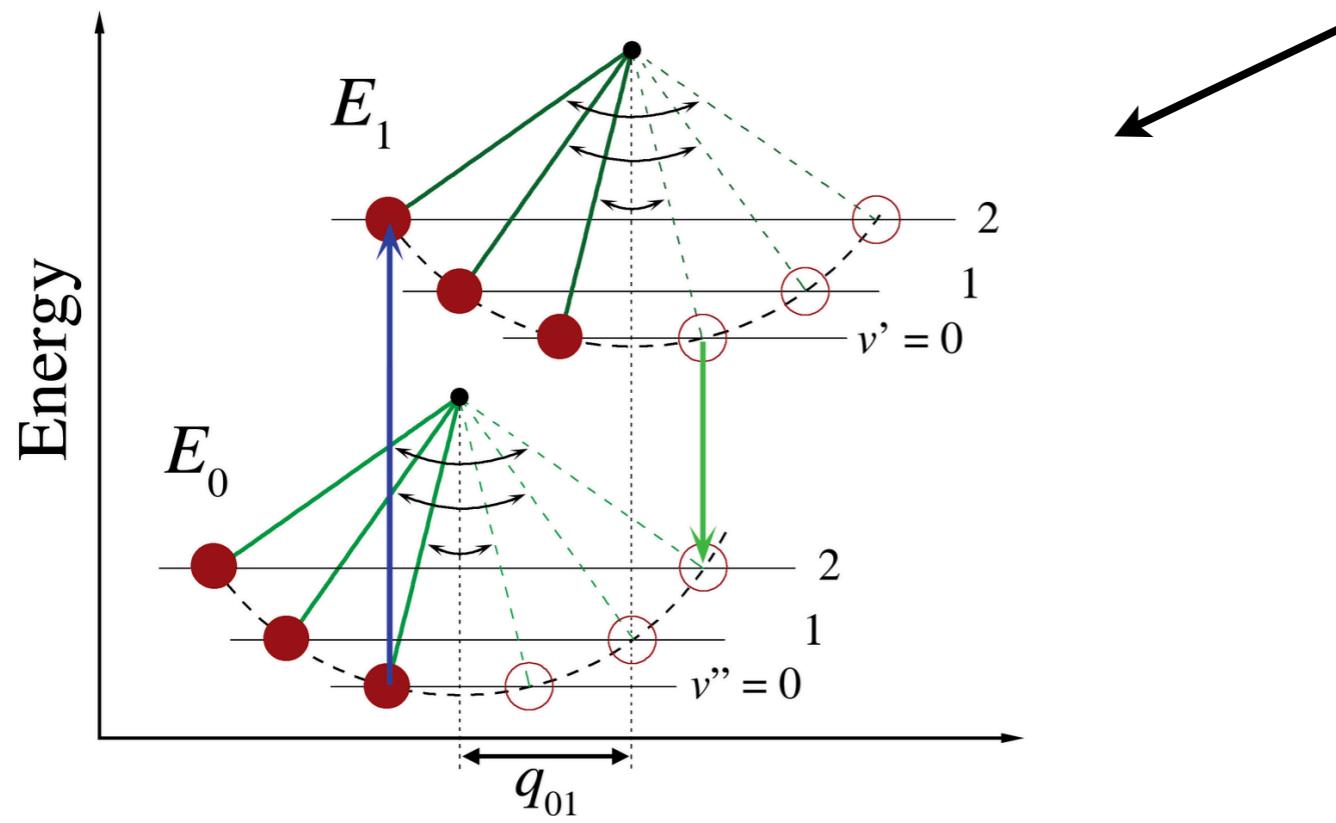


formando orbitais  
híbridos, responsáveis  
pela cintilação

níveis de energia de uma molécula orgânica

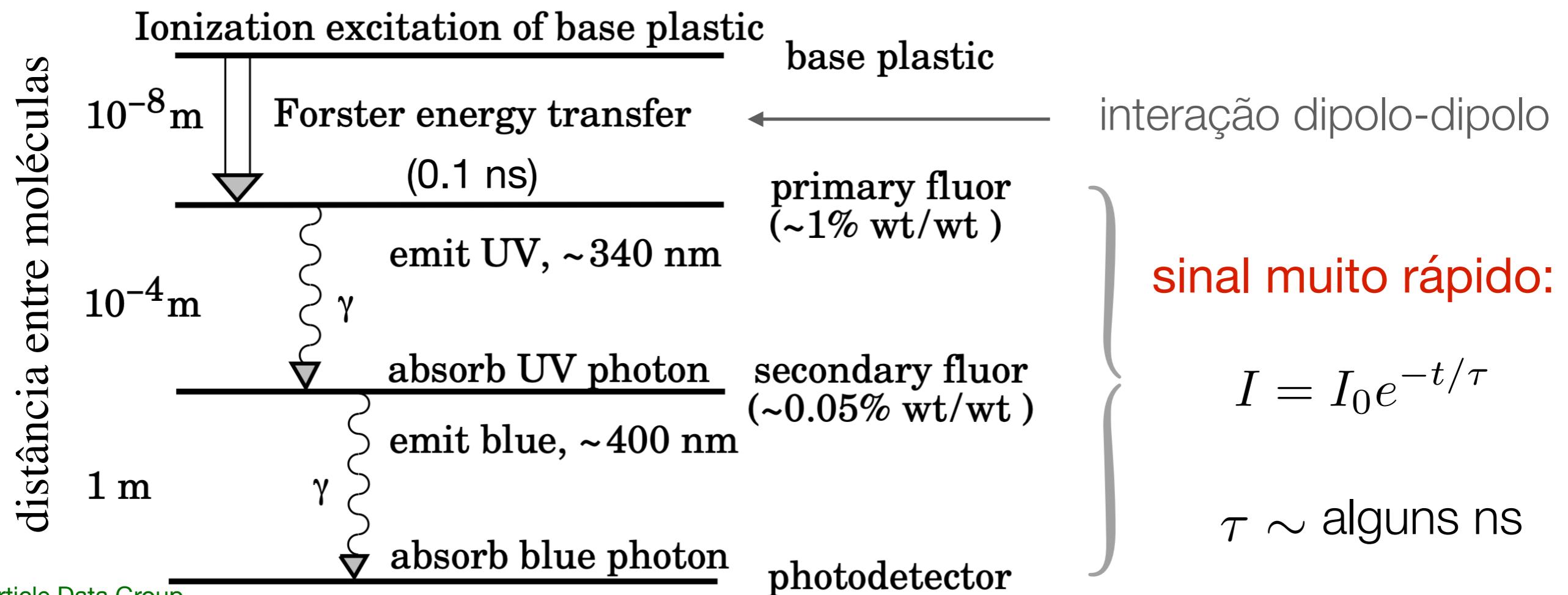


- ♦ moléculas absorvem energia da radiação ionizante, passando a um estado de **excitação eletrônica**
- ♦ além da excitação eletrônica: **modos de vibração molecular**
- ♦ A transição  $E_0 \rightarrow E_1$  leva também a um modo de vibração diferente

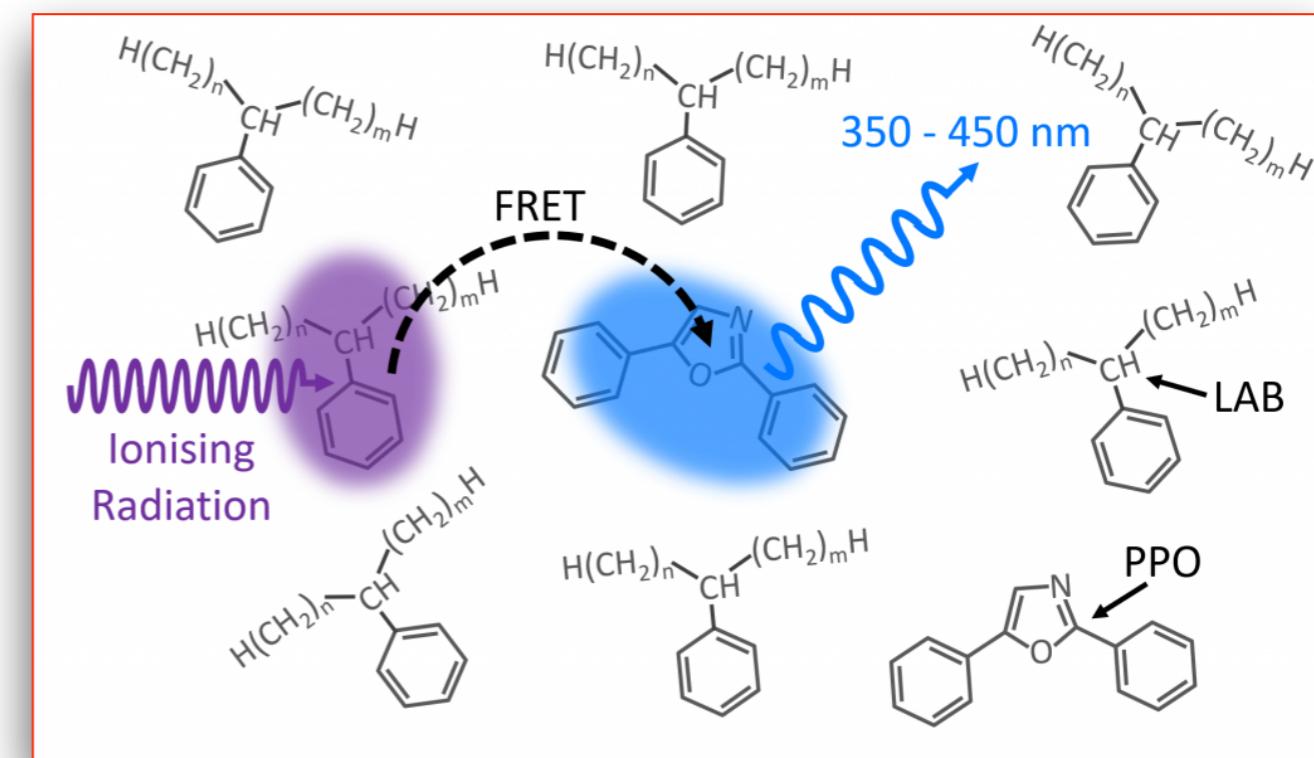
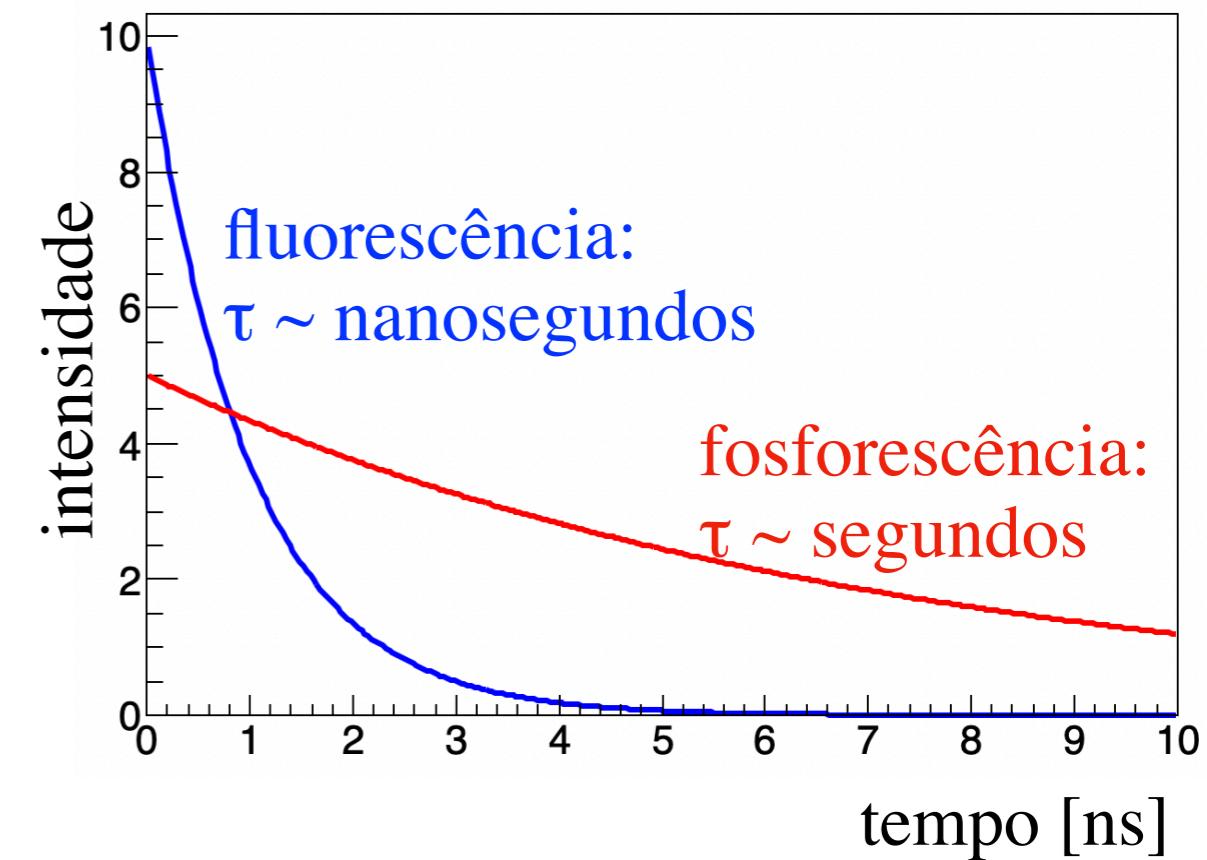
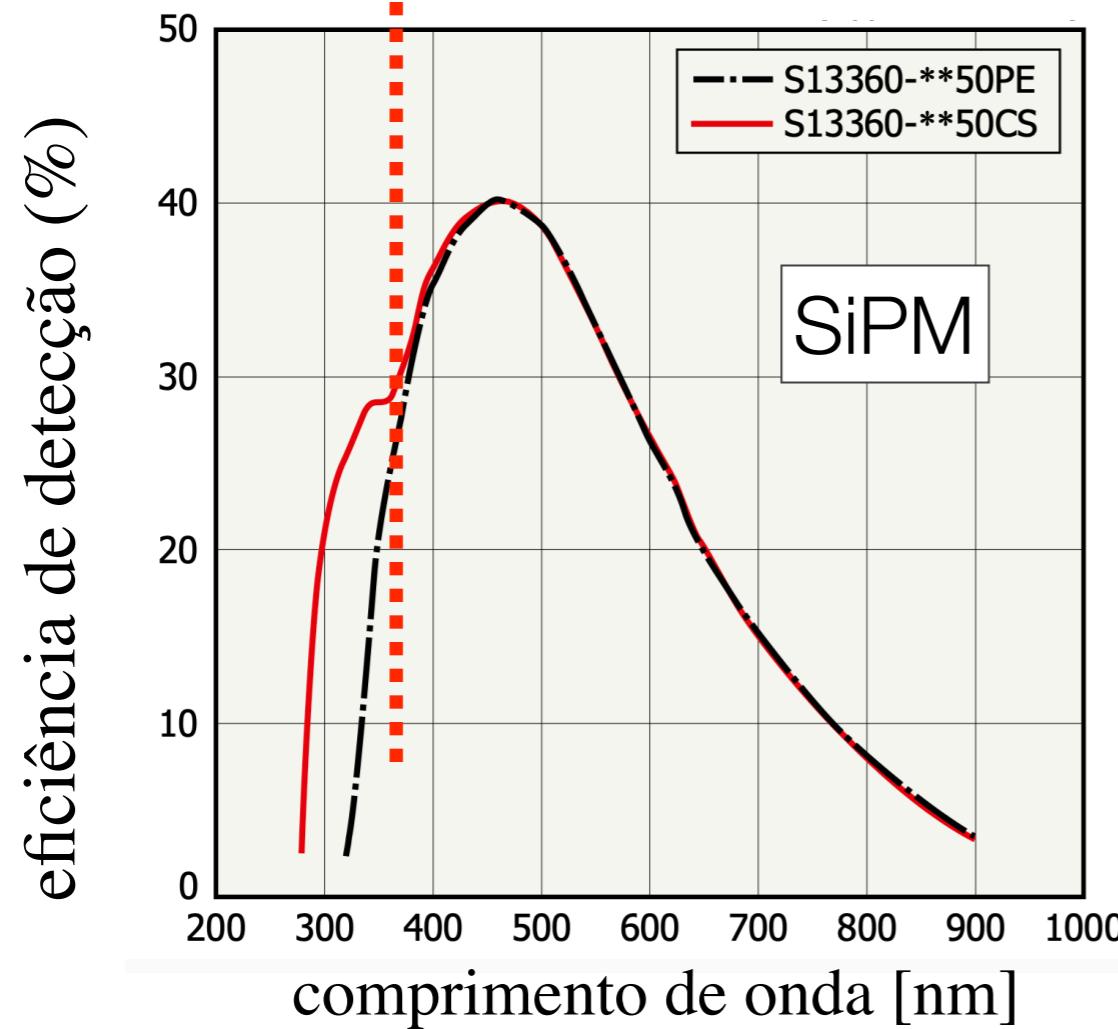
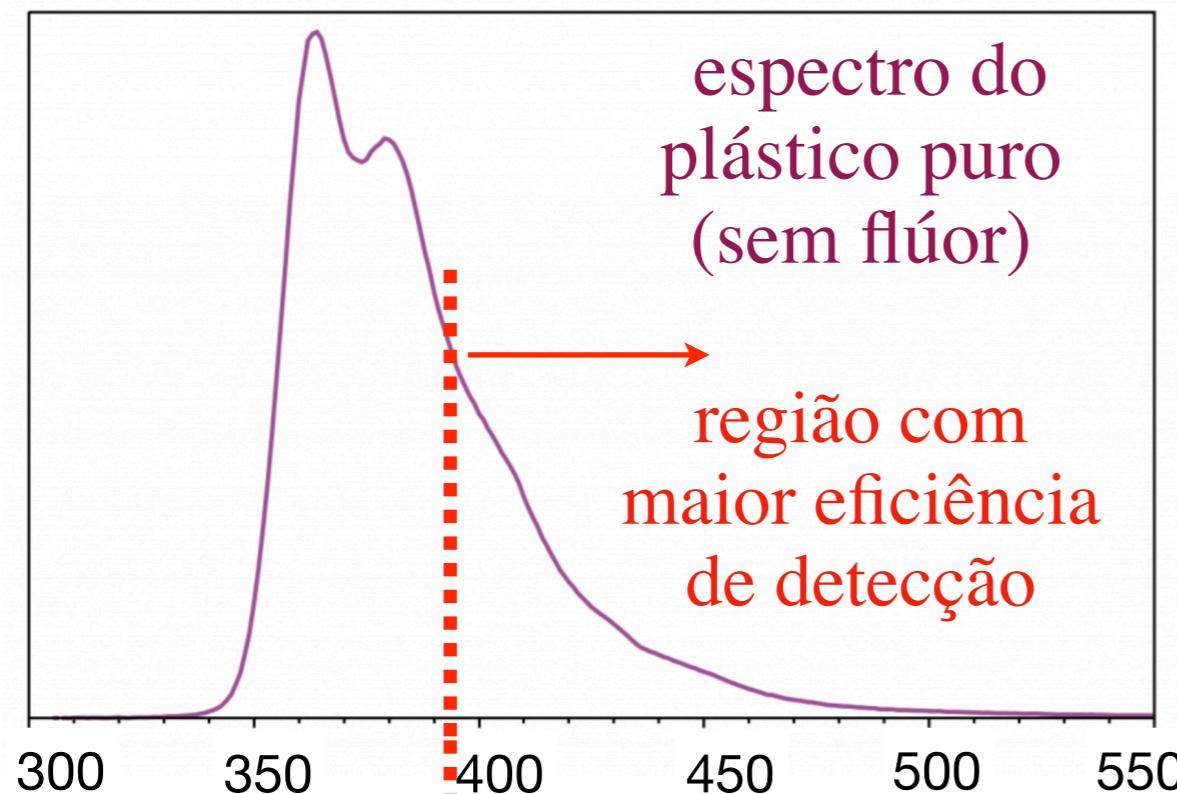


- ♦ cintilação: um fóton com maior comprimento de onda é emitido na volta ao estado fundamental eletrônico

- ~ 3% da energia depositada no cintilador por uma MIP é emitida na forma de fótons UV: frequências inadequadas aos detectores de fótons
- ~  $\sim 10^4$  fótons / cm emitidos quando uma MIP atravessa um cintilador
- esses fótons seriam rapidamente reabsorvidos pelo cintilador
- a adição de pequenas quantidades de "flúores" reduz o comprimento de onda da radiação, a reabsorção e o tempo de emissão dos fótons



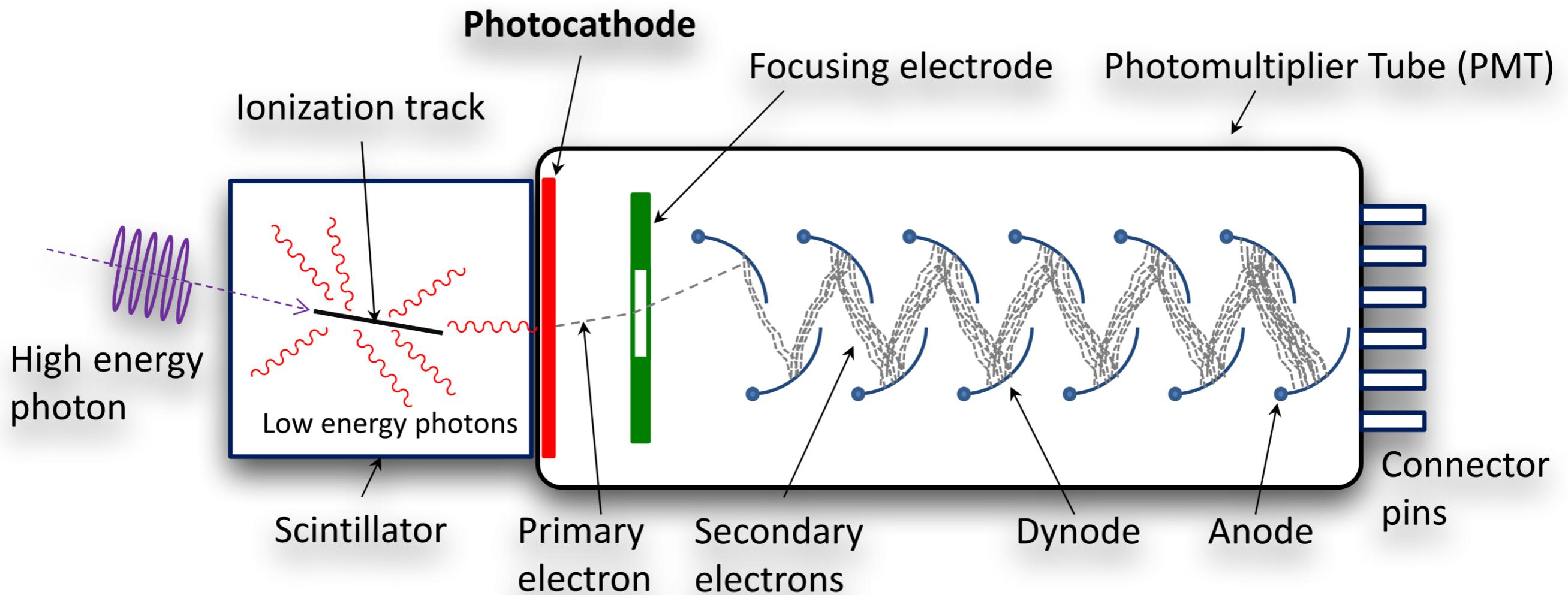
intensidade



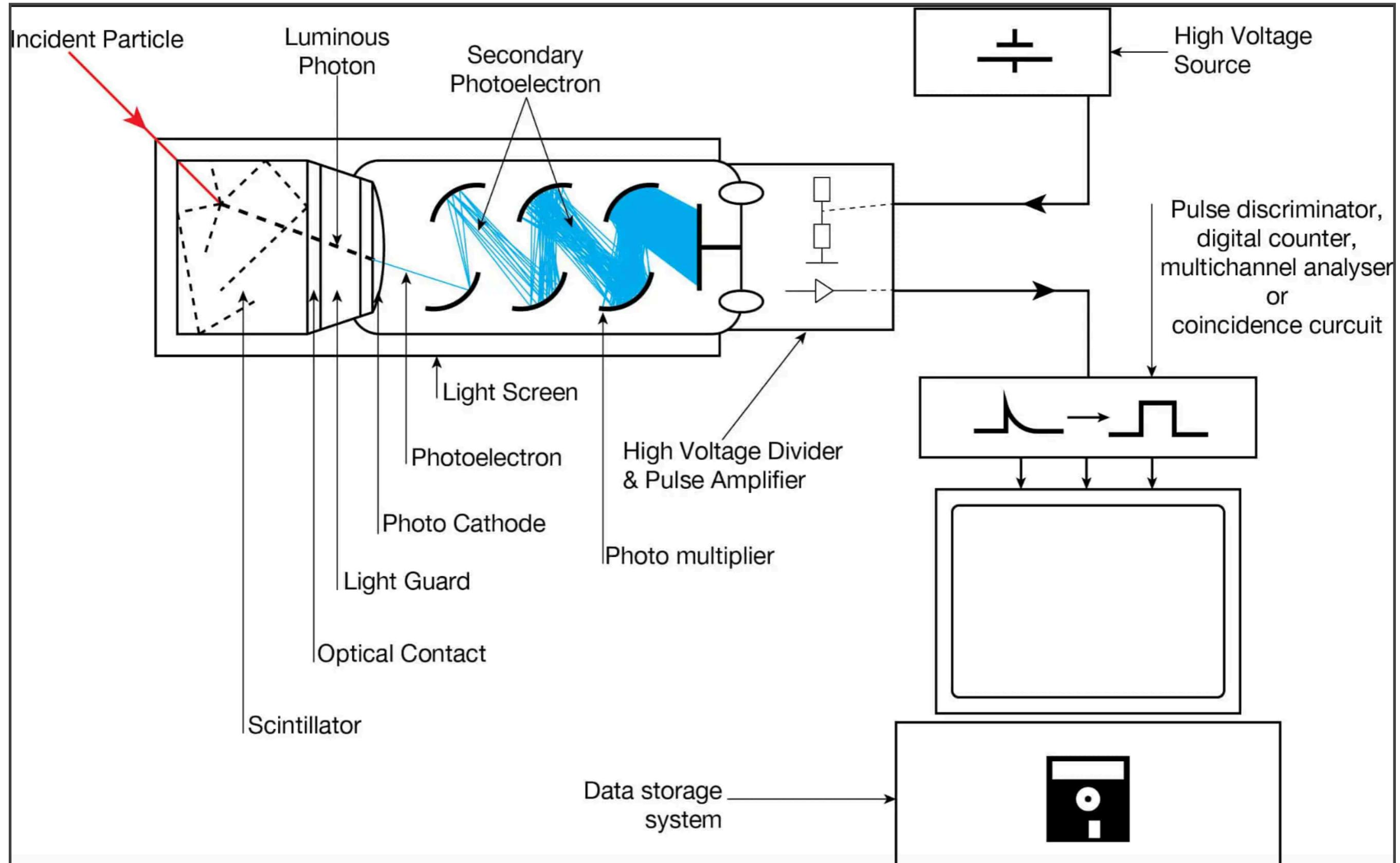
FRET: Förster Resonant Energy Transfer

## Esquema típico de uma PMT

Cada dinodo tem voltagem de 100 a 150 V relativa ao dinodo anterior.

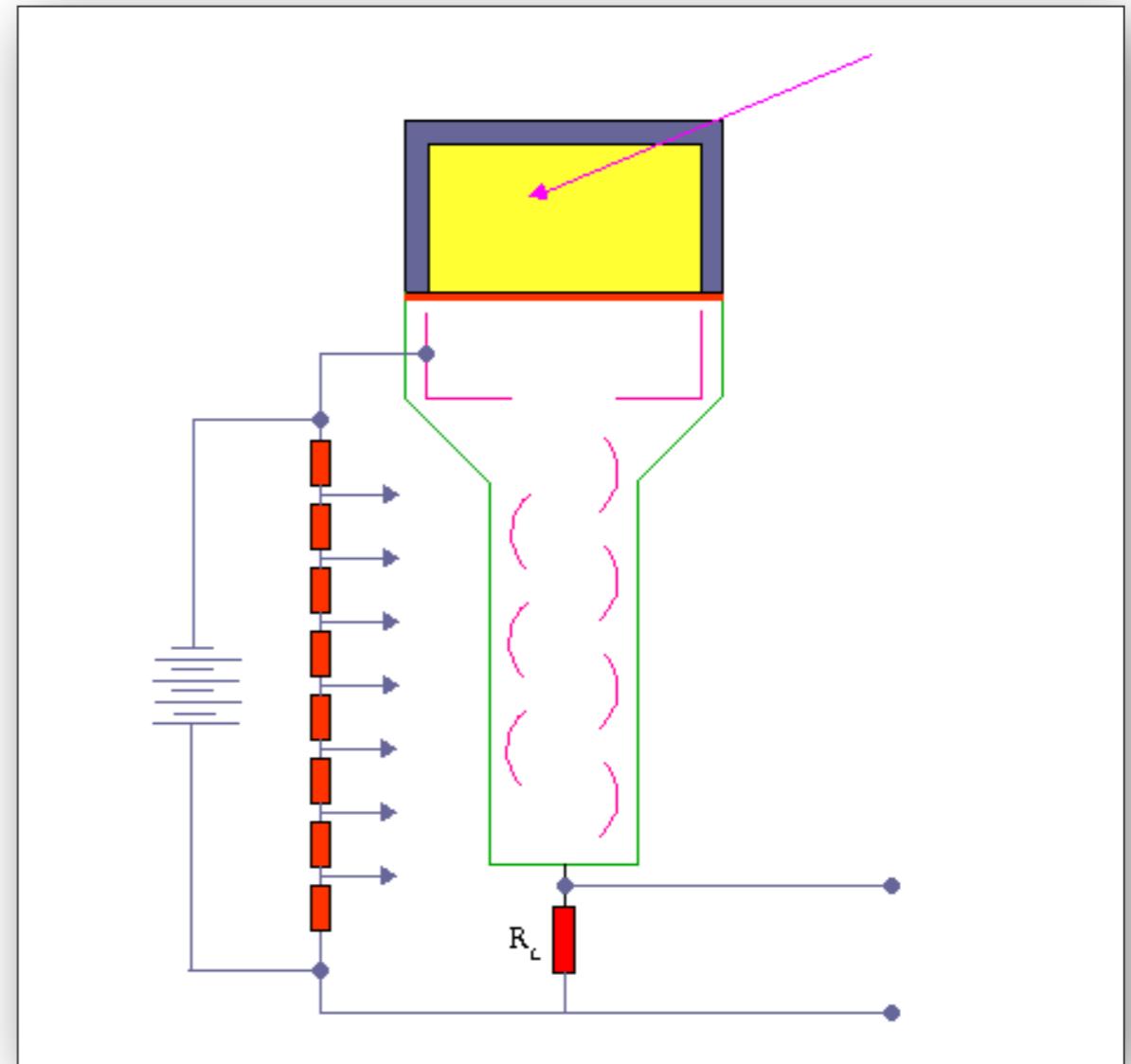


100 – 150 V entre dois dinodos: de 3 a 5 elétrons secundários.  
Ao final, uma amplificação de  $10^8$  elétrons

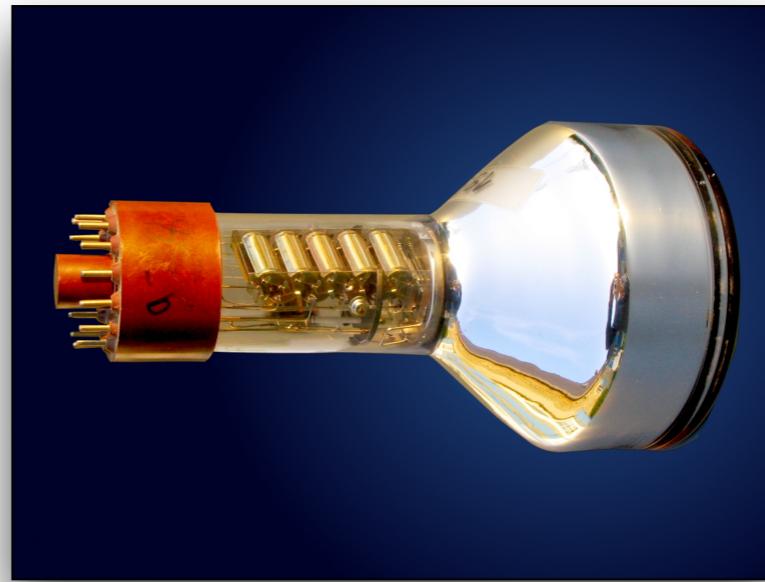
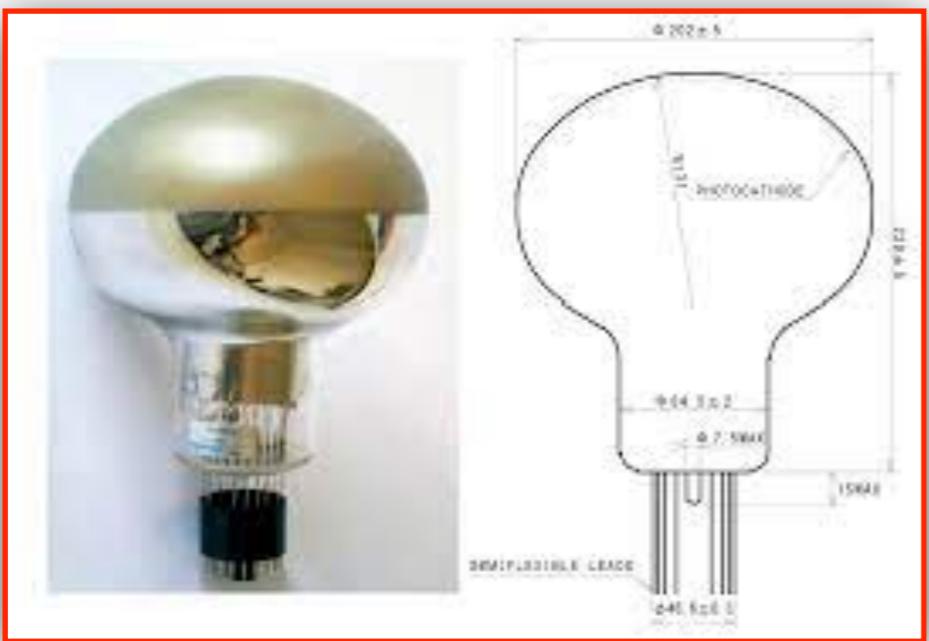


# Características importantes dos foto-detectores:

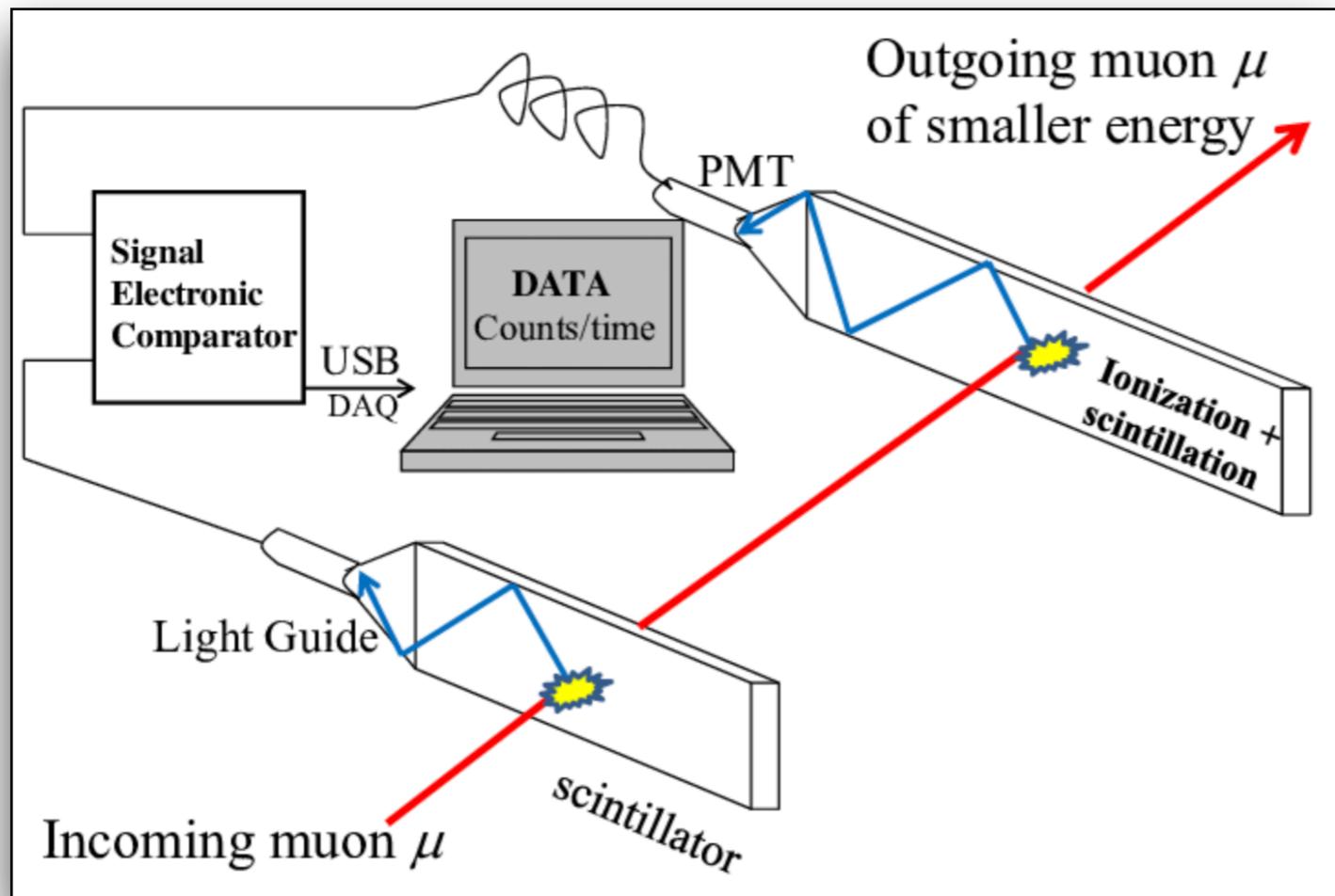
- **sensitividade**: intervalo de frequências detectáveis
- **eficiência quântica**: número de foto-elétrons produzidos por fóton incidente
- **tempo de resposta**: tempo entre a chegada do fóton e o pulso elétrico de output
- **tempo morto**: tempo mínimo necessário entre a chegada de dois fótons consecutivos
- **ganho**: número de elétrons coletados por foto-elétron primário
- **corrente escura**: sinal elétrico quando não há fótons incidentes



# Alguns tipos de PMT



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=121688>



setup básico para detecção direta

setup básico para trigger

