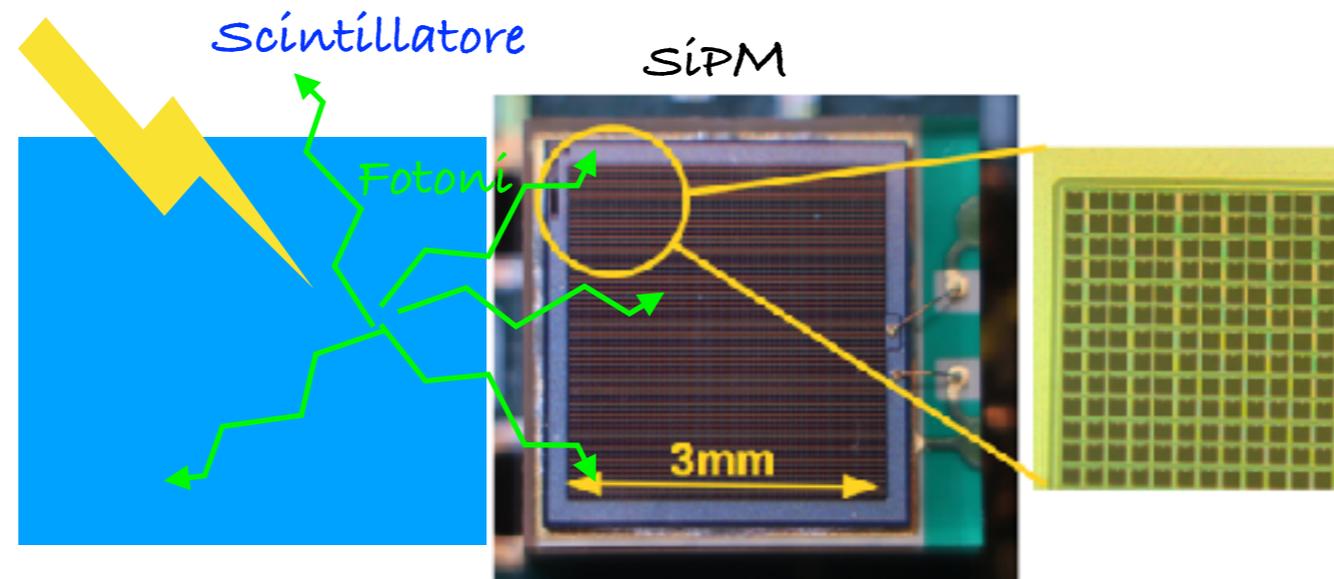


# Rivelatori di luce

## SiPM

# SiPM in breve

È un **fotomoltiplicatore al Si**, basato su una **giunzione PN**, costituito da un **array di microcelle SPAD** che operano in **modalità Geiger**

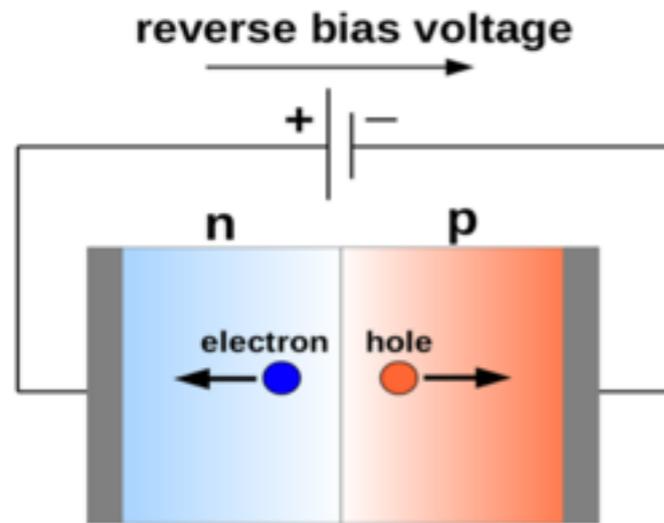


## VANTAGGI:

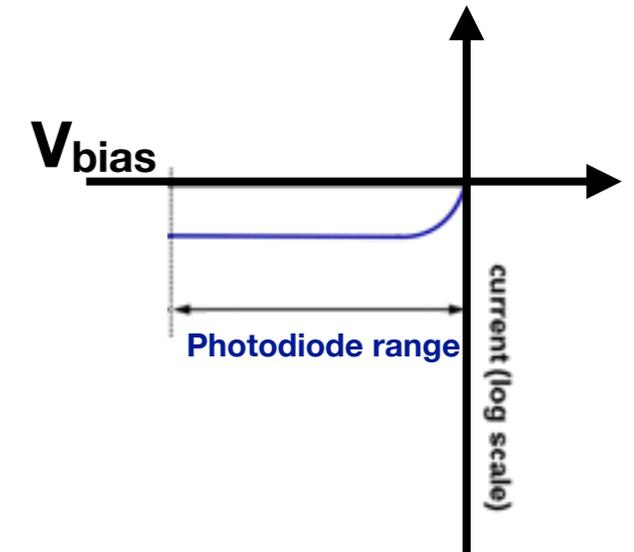
- più **compatti** (qch.  $\text{mm}^2$  vs. tubo a vuoto  $\sim 10$  cm)
- più robusti
- **insensibili ai campi magnetici**
- operano a **basse tensioni di lavoro** (30 V vs. 1-2 kV) pur avendo **guadagni  $\sim 10^6$**
- maggiore **efficienza quantica** (50% vs. 25%)
- rivelare bassi segnali di luce (arrivano fino al **singolo fotone**)
- **rumore** al livello di singolo fotone
- può discriminare il **numero esatto di fotoni** incidenti come livelli discreti
- permette di ottenere uno **spettro ben risolto** (PMT ha gain variabile e più rumore)
- ottime proprietà **temporali** (usati in CMS, PET)

# Da fotodiodo a SPAD (1)

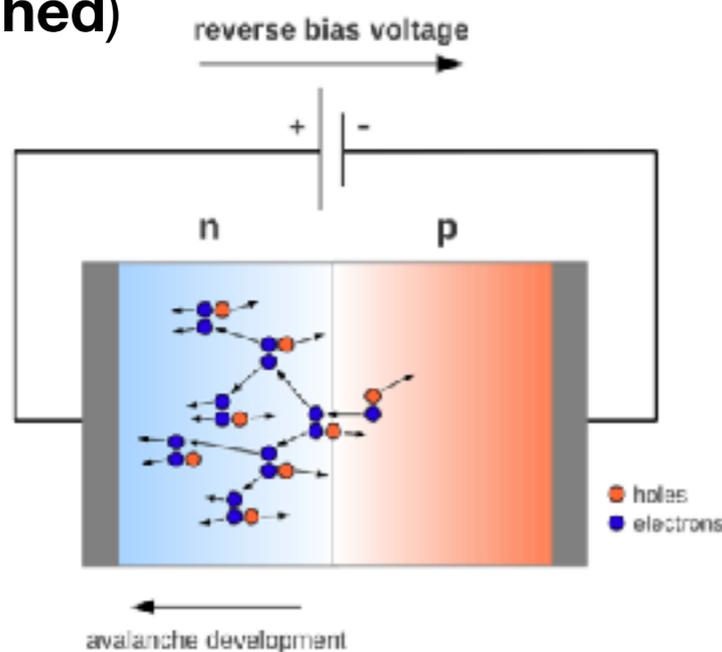
- **Giunzione PN in Si polarizzata inversamente** -> quando fotone ottico incide nella regione di svuotamento crea coppia  $e^-h^+$  che sotto l'azione di  $\underline{E}$  crea corrente  $I$



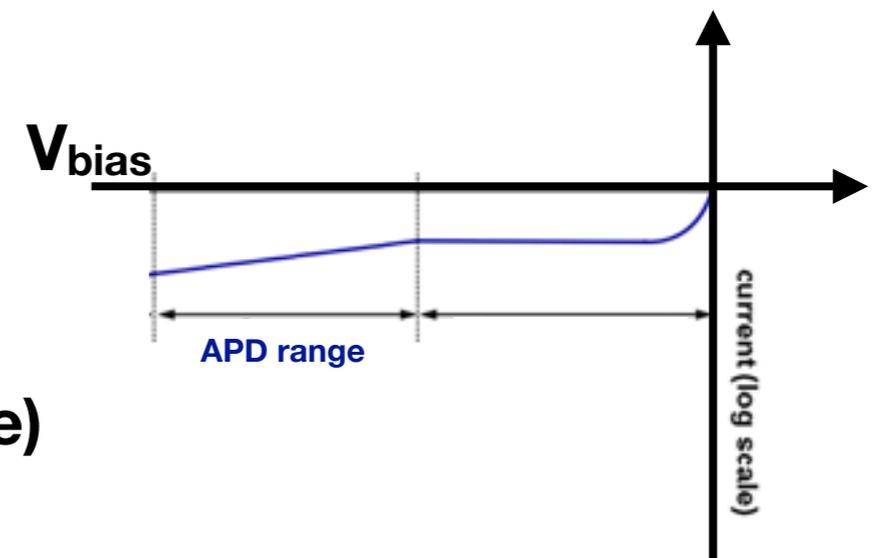
≡ **Fotodiodo**



- **Se aumento  $V$  entro in un regime in cui gli elettroni accelerati producono altre coppie.** È un regime **proporzionale ( $I \propto V$ )**, il guadagno è limitato ( $\sim 100$ ), e la valanga si auto-smorza (**self-quenched**)



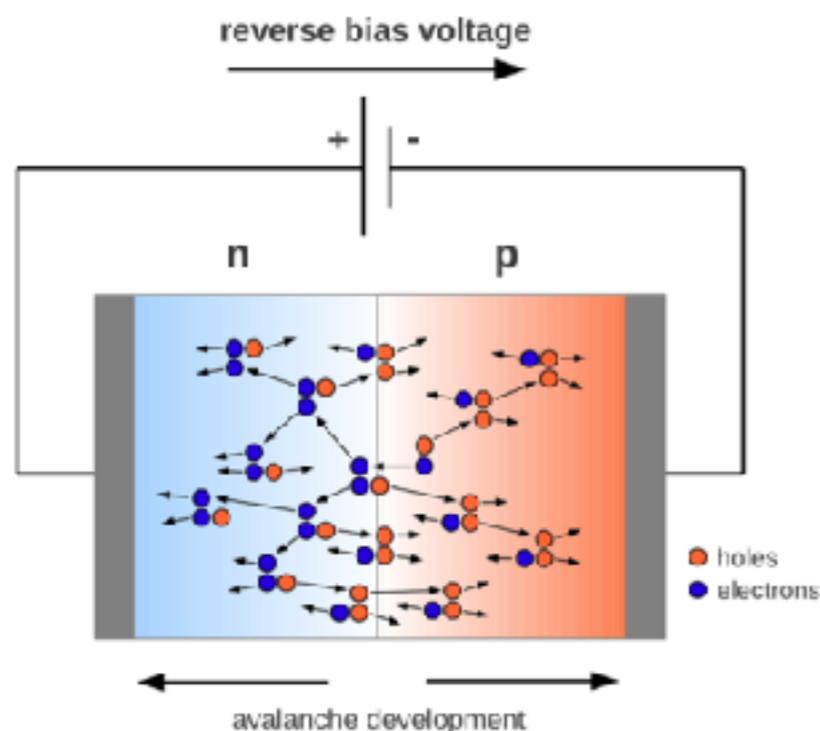
≡ **APD**  
**(Avalanche Photo Diode)**



## Da fotodiodo a SPAD (2)

Con  $V_{\text{bias}} > V_{\text{break-down}}$  ( $> 5 \times 10^5$  V) sia  $e^-$  che  $h^+$  molto accelerati creano  $e^-h^+$  secondari  
-> il fotone iniziale da origine a I macroscopica e il Si diventa conduttivo (fa breakdown)  
 $\equiv$  nasce una **SCARICA GEIGER** con un altissimo numero di portatori ( $\sim 10^6$ )

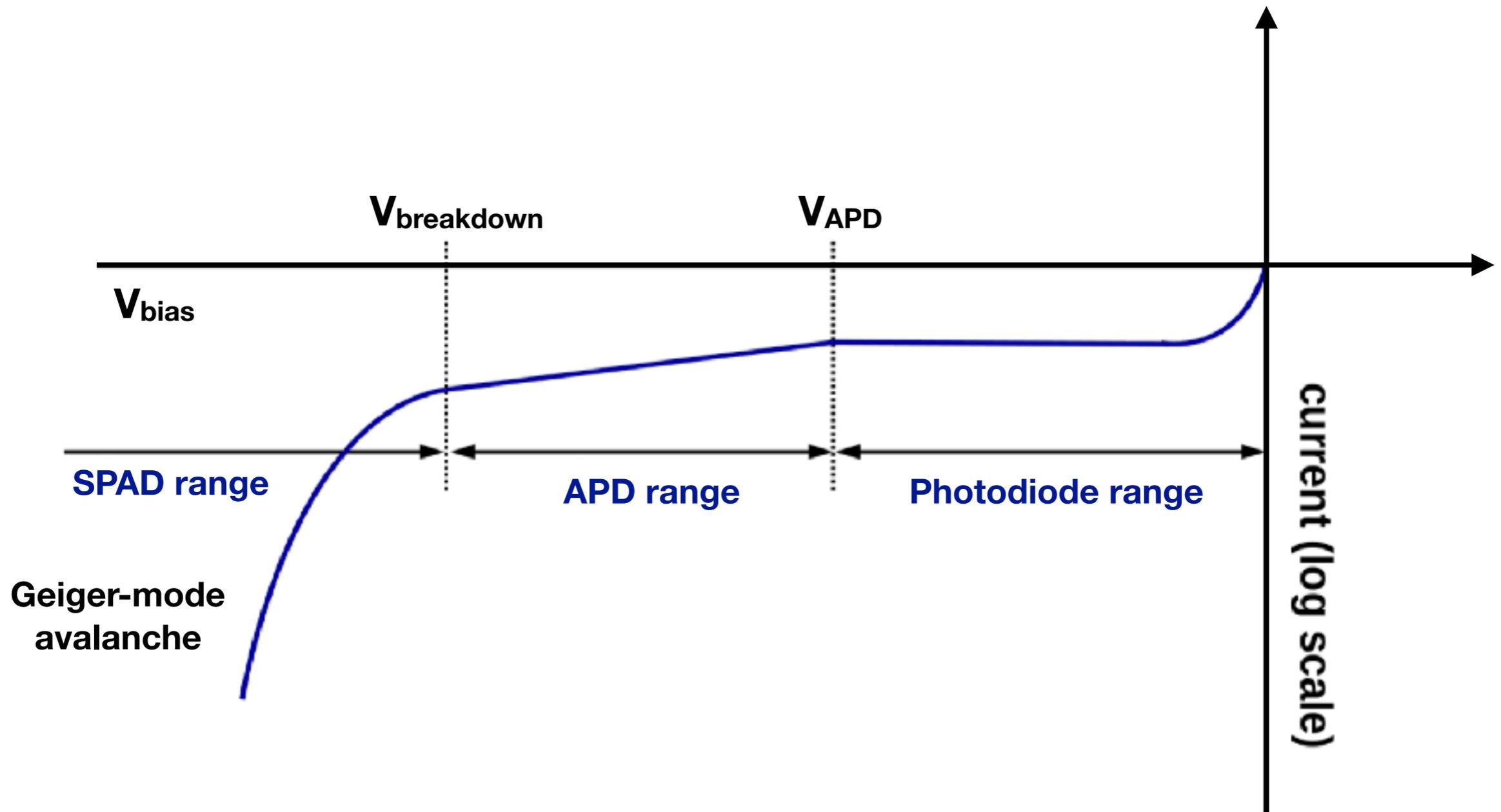
È un regime **non proporzionale** e servono resistenze esterne per smorzare la valanga



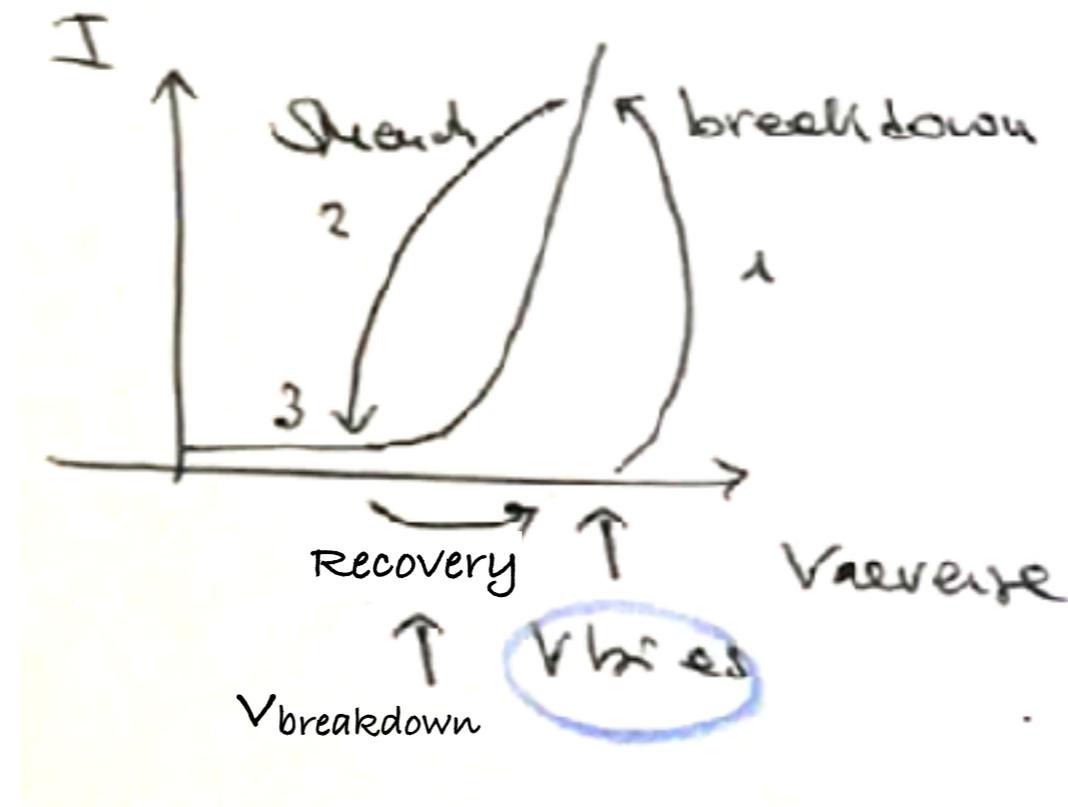
### Single Photon Avalanche Diodes (SPAD)

*Riesce a rivelare il singolo fotone grazie all' alto guadagno*

# Da fotodiodo a SPAD (3)



# Ciclo di lavoro nello SPAD



0. Polarizzo il SiPM con  $V_{bias} > V_{breakdown}$
1. Quando la radiazione incide genera **coppia e-h e parte la scarica Geiger** (breakdown)
2. La caduta di potenziale su  $R_Q$  (resistenze di quenching esterne) **smorza la I**
3. Quando  $V < V_{breakdown}$  **la cascata si ferma**
4. Entro il tempo  $t_{recovery}$  ( $\tau_{rec}$ ) il sistema ritorna a  $V_{bias}$

# Da SPAD a SiPM

---

Il **segnale** è il medesimo indipendentemente dal numero di fotoni incidenti  
-> **perdo l'informazione sul numero di fotoni incidenti e quindi sull'energia** depositata nello scintillatore. **Soluzione:**

**Il SiPM è costituito da un array denso di piccoli SPAD ( $\mu$ celle): 100-1000 /mm<sup>2</sup>**

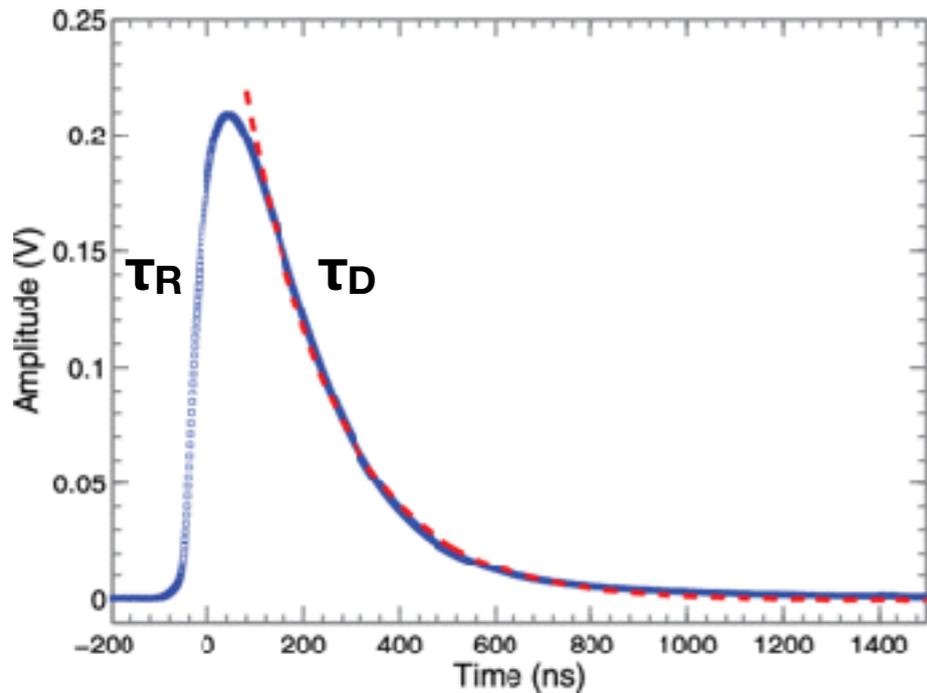
- Si attivano solo le celle su cui un fotone deposita energia
- La probabilità che più fotoni attivino una  $\mu$ cella è bassa grazie alle piccole dimensioni ( $\mu$ m)
- Ogni cella ha cascata separata

$$\sum_{i=\mu\text{celle}} I_i = N_{\text{celle}} I_{\text{cella}}$$

- $N_{\mu\text{celle}} \approx N_\gamma$
- È **segnale** quasi-analogico di output, che mantiene l'informazione sull'ampiezza del flusso di fotoni  $N_\gamma$

**Accoppiando SiPM a scintillatore: ho informazione su  $N_\gamma$  prodotti nello scintillatore al passaggio della particella con  $N_\gamma \div E_{\text{particella}}$**

# Forma dell'impulso



- **Il Rise Time ( $\tau_R$ ):** è dato dal t di formazione della valanga e dal t di transito (che è diverso per segnali che partono da punti diversi dell'area attiva)
- **Il Decay Time ( $\tau_D$ ):** è dato dal tempo di recovery della  $\mu$ cella

$$\tau_{rec} = C_D \cdot (R_Q + R_S \cdot N)$$

$C_D$  = capacita della  $\mu$ cella

$R_q$  = R di quenching della  $\mu$ cella

$R_s$  = ogni resistenza in serie col sensore

$N$  = numero di  $\mu$ celle

Durante il  $\tau_{rec}$  la cella può registrare impulsi ma il guadagno sarà minore (perchè  $V < V_{bias}$ )  
 => l'impulso sarà più basso a parità di energia infatti  $I_{out}$ , è proporzionale alla  $Q_{tot}$ , data da:

$$Q_{tot} = N_{fired} \cdot G \cdot q$$

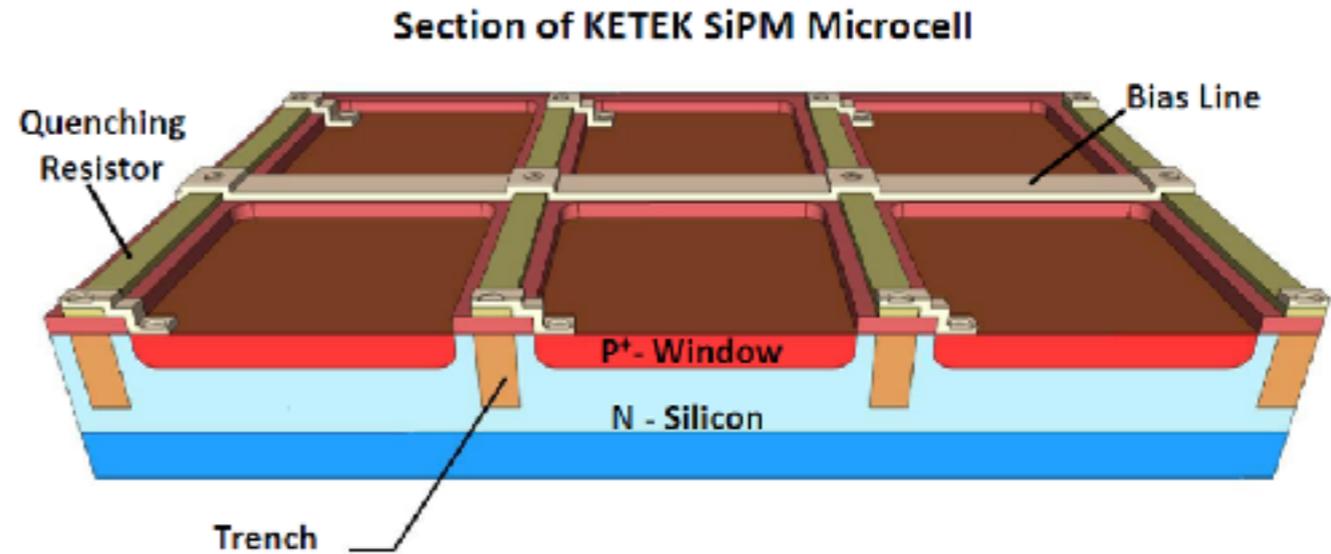
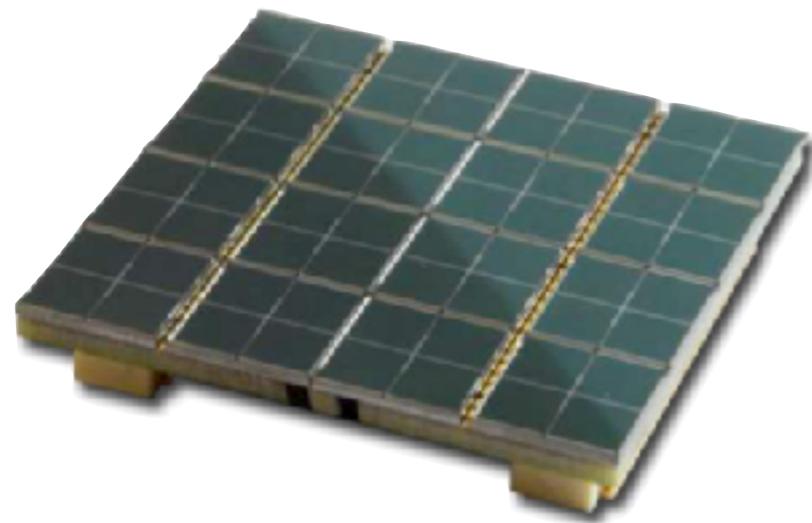
$q = e$

$G$  = guadagno della singola  $\mu$ cella (fz. di V)

$N_{fired}$  = numero  $\mu$ celle che danno segnale

$Q$  per ogni  $\mu$ cella

# Fill factor



Attorno ad ogni  $\mu$ cella c'è dello **spazio morto** (separazione tra le celle,  $R_Q$ , lettura segnale, polarizzazione...), che è circa il medesimo per ogni  $\mu$ cella.

**fill-factor**  $\equiv$  % della superficie del SiPM che è sensibile alla luce

=> **Compromesso**: maggiore dimensione cella dà:

- 😊 alti F, PDE e Gain
- 😞 alti  $C_D$ ,  $\tau_{rec}$  e minor range dinamico

# Parametri per valutare le prestazioni di un SiPM

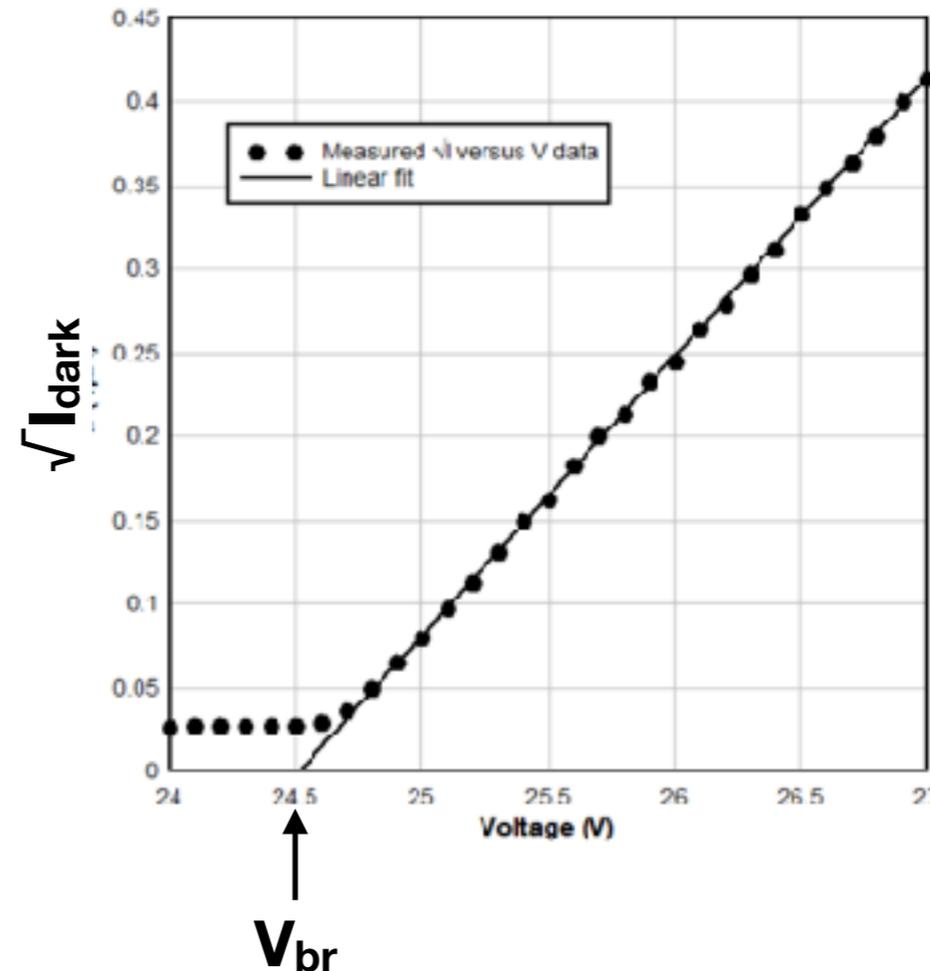
**I parametri principali per caratterizzare un SiPM sono:**

- $V_{\text{breakdown}}$  e OverVoltage
- Guadagno
- Photon Detection Efficiency
- Dark count rate
- Cross talk ottico
- After pulsing
- Dipendenza dalla temperatura

# $V_{\text{breakdown}}$ e OverVoltage

$V_{\text{breakdown}}$  è la  $V_{\text{bias}}$  a cui  $\underline{E}$  nella regione di svuotamento causa una scarica Geiger

Per misurarlo:  $I_{\text{dark}}$  al variare di  $V_{\text{bias}}$



$V_{\text{bias}}$  ottimale: ~10-25% maggiore di  $V_{\text{BR}}$

*Specifica  
solitamente data  
dal produttore*

$$V_{\text{bias}} = V_{\text{br}} + \Delta V \rightarrow \text{overvoltage}$$

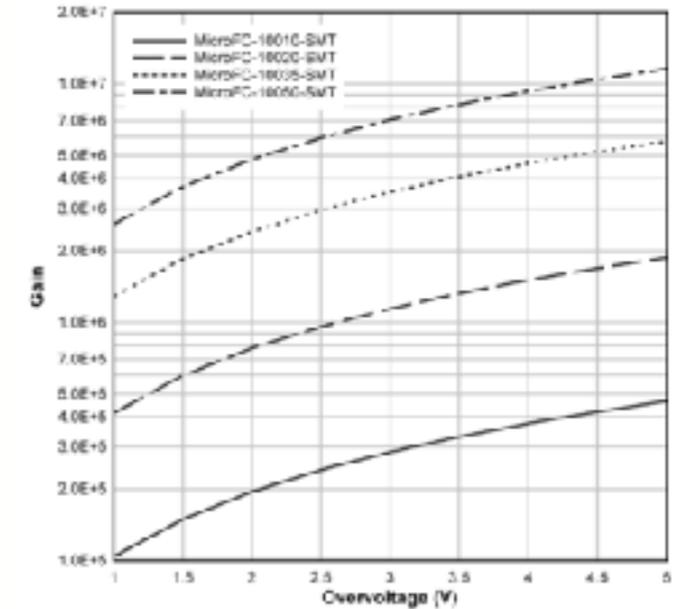
# GUADAGNO

Il guadagno è la quantità di carica creata per ogni fotone rivelato

Guadagno per la singola cella:

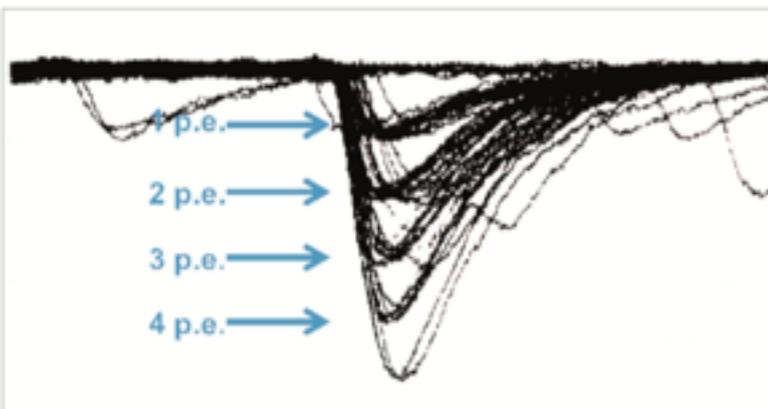
C = capacità cella

$$G = \frac{C \cdot \Delta V}{e} Q_{\mu\text{cella}}$$



Dipende da  $\Delta V$  e dalle dimensioni della cella

**Per misurarlo:**  
se arrivano più fotoni si illuminano più celle

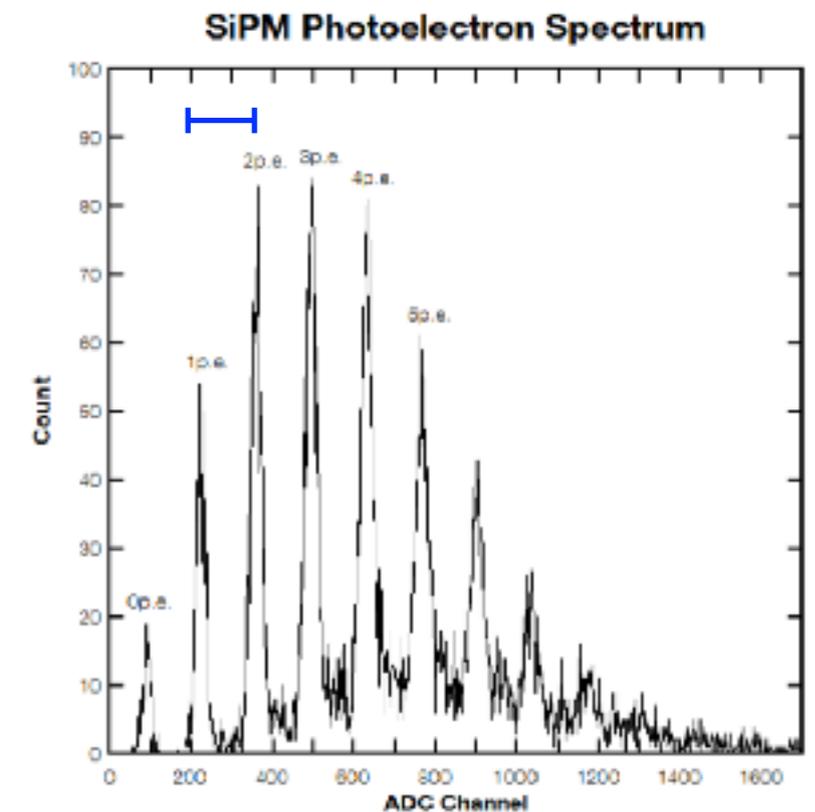


Dalla distanza dei picchi nello spettro ottenuto dal segnale integrato su tutte le celle  
=>  $Q_{\mu\text{cella}}$  (in ADCchannels)

$$G = \frac{\Delta_{ADC\text{channels}} (in Q)^*}{e}$$

$$(*) \text{ ADCfactor} = \frac{ADC_{channels}}{\text{Coulomb}} \cdot \frac{V_{ref}}{R_{ref}} \cdot \frac{1}{2^{bits}} \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{G_{PSM}}$$

$V_{ref} = 2V$ , Digital dynamic range  
 $R_{ref} = 500 \text{ M}\Omega$  (over input impedance)  
 $N_{bits} = 12$  bit digital resolution  
 $\Delta t = 4 \text{ ns}$ , Digital sampling period  
 $G_{PSM} = 20$  for 25C, 20 for 100C, PSNU gain



# Photon Detection Efficiency

È la probabilità che un fotone incida su una cella e generi una valanga (e quindi un segnale)

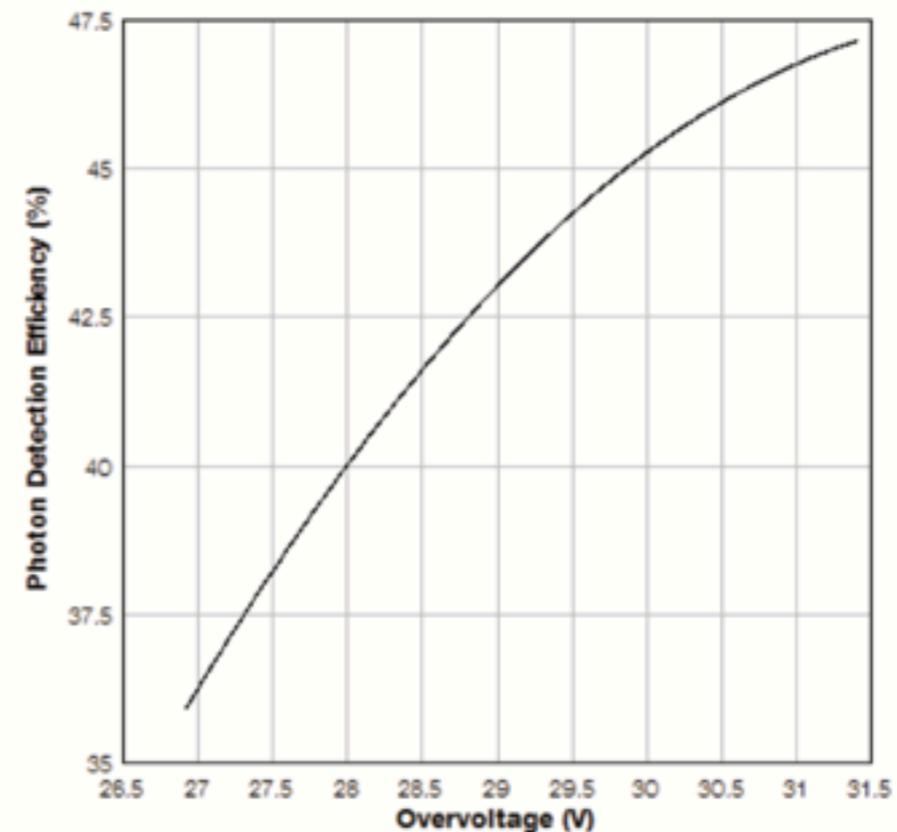
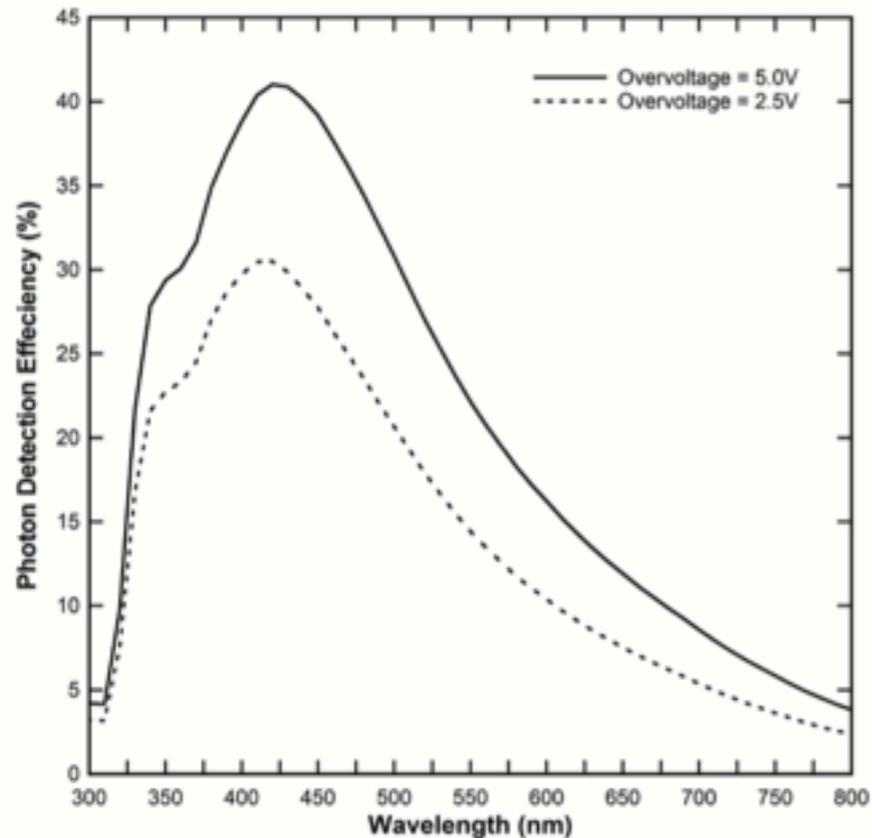
$$PDE(\lambda, V) = \eta(\lambda) \cdot \xi(V) \cdot F$$

$\eta$  = Efficienza Quantica del Si (fotone  $\rightarrow$   $p_e$ )

$\xi$  = probabilità di inizio valanga ( $p_e \rightarrow$  valanga)

F = Fill Factor

Dipende dalla  $\lambda$  incidente e dal  $V_{bias}$



# Dark Count Rate

Rate di eventi registrati in assenza di sorgente luminosa

- Maggiore sorgente di **rumore**
- Dovuta principalmente a elettroni generati termicamente nel volume attivo
- Cresce con  $V_{\text{bias}}$ ,  $T$ , area  $\mu\text{cella}$

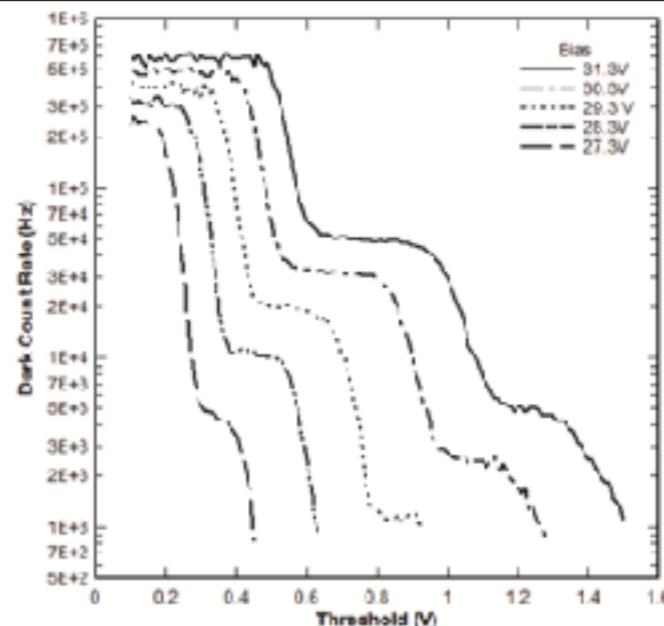
Sono **impulsi ~ di singolo fotone** (poco probabile che avvengano in contemporanea in più celle)

=> **se** in contemporanea **arriva un impulso** luminoso questo noise contribuirà all'impulso finale provocando una **distorsione dell'ampiezza**

**Per misurarlo:**

metto soglia a 1/2 fotone  
e misuro il rate sopra essa

**Staircase plot**

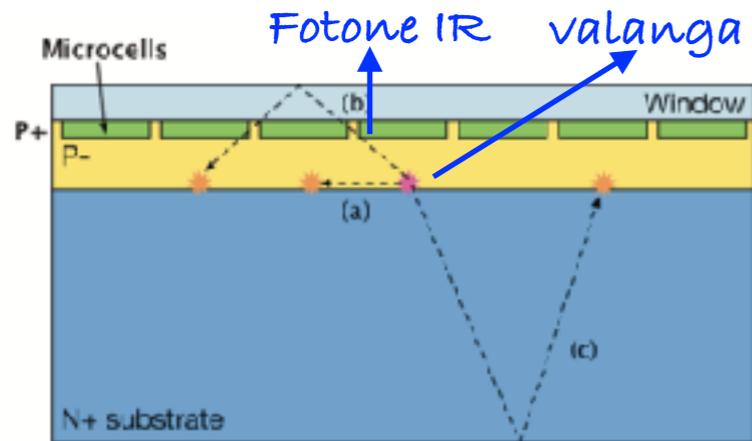


**Per ridurlo:**

**soglia** sopra il livello del  
singolo fotone (ok per misure  
non di singolo fotone)

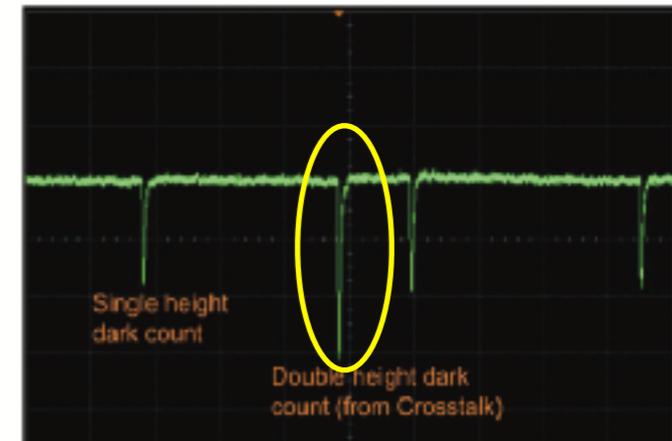
# Crosstalk ottico

Probabilità che la valanga in un  $\mu$ cella causi una valanga in un'altra  $\mu$ cella



- Sorgente addizionale di **rumore**
- Gli e- accelerati durante una valanga possono produrre fotoni secondari (IR), propagando nel Si, possono colpire altre celle iniziandovi un'altra valanga
- Cresce con  $\Delta V$ , F

Il CT avviene simultaneamente al segnale originario, e quindi **segnali di singolo fotone vengono rivelati come segnali di più fotoni** (a seconda di quante celle vengono affette dal CT)



**Per misurarlo:**  
dallo staircase plot

$$\frac{DC_{rate} | 2 \text{ fotoni}}{DC_{rate} | 1 \text{ fotone}}$$

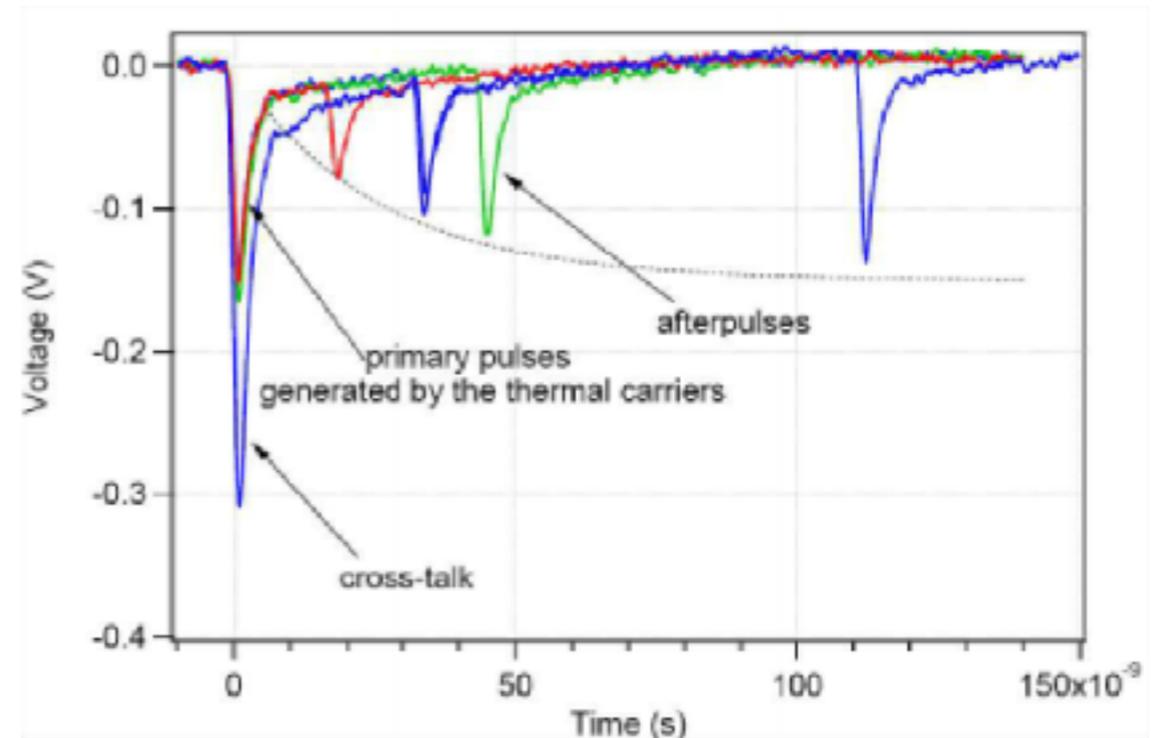
**Per ridurlo:**

compromesso tra PDE (migliora con  $\Delta V$ )  
e CT (peggiora con  $\Delta V$ )

# Afterpulsing

Impulso dovuto a valanga secondaria nella stessa cella causata da  $e^-$  intrappolato che si libera dopo  $\Delta t$  (fino a ns)

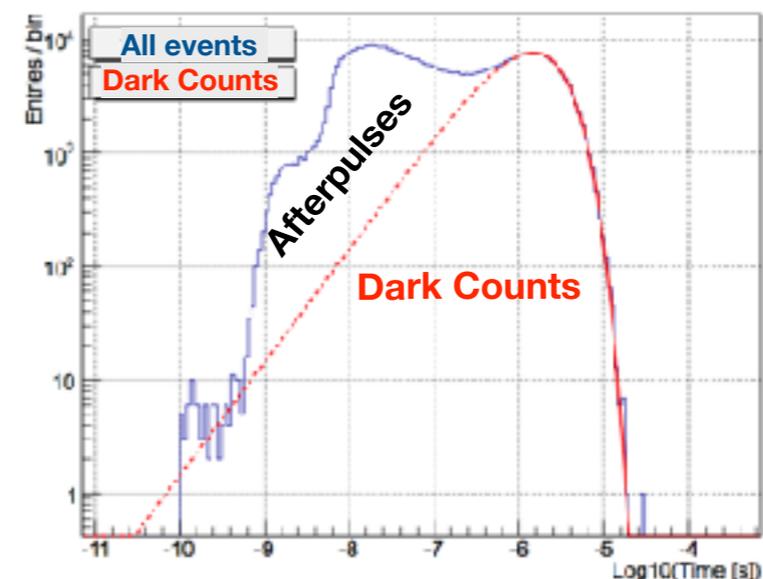
- Afterpulses che avvengono entro un  $\Delta t < t_{\text{recovery}}$  **hanno poco impatto** perchè l'ampiezza è piccola
- Afterpulses che avvengono con un  $\Delta t > t_{\text{recovery}}$  **hanno impatto alto se il rate della misura è alto**
- La probabilità di afterpulsing **cresce con  $\Delta V$**  (per la maggior probabilità di inizio valanga)



## Per misurare la probabilità di AP:

misuro la distribuzione statistica di eventi consecutivi di dark count con soglia a 0.5 dell'ampiezza di singolo fotone:

$$\text{Area}_{\text{Afterpulses}} / \text{Area}_{\text{Totale}}$$



# Range dinamico e linearità

Ampiezza massima misurabile dal SiPM, oltre la quale l'output non è più affidabile

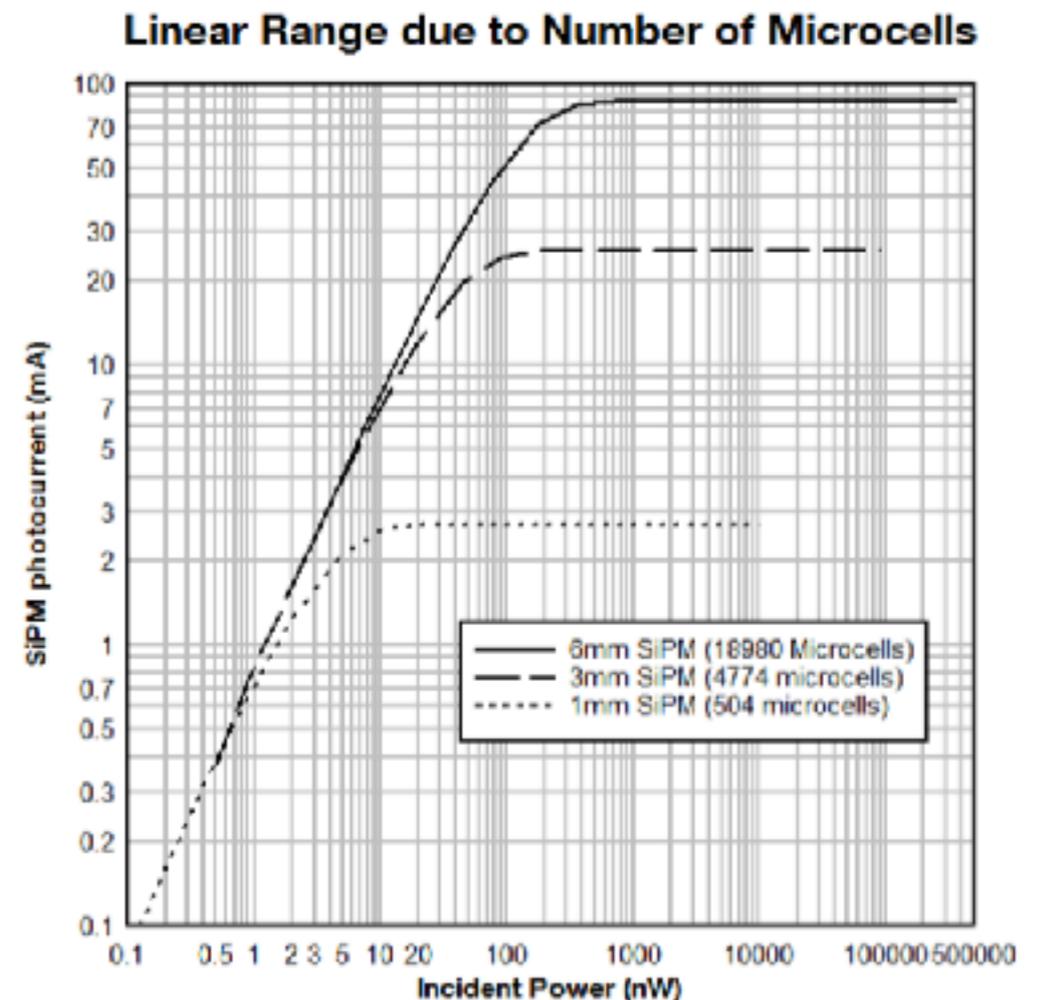
- Flussi di fotoni incidenti troppo alti possono **saturare** il SiPM (tutte le celle accese)
- La **linearità** tra  $I_{out}$  e la potenza incidente si ha **fino a ~70%** del range dinamico
- Il RD dipende da  $N_{\mu\text{celle}}$ ,  $\Delta V$ ,  $\lambda$

Numero  $\mu\text{celle}$  accese ( $\div I_{out}$ )

$$N_{fired}(N_{celle}, V, \lambda) = N_{celle} \left( 1 - \exp\left(-\frac{PDE(V, \lambda) \cdot N_{fot}}{N_{celle}}\right) \right)$$

Per potenze basse:  $N_{fired} = PDE \times N_{fot}$

Per potenze alte:  $N_{fired} = N_{celle}$



# Dipendenza dalla temperatura

Variazioni di temperatura inducono variazioni nel  $V_{br}$  e nel DC rate

- $V_{br}$  cambia **linearmente** con T (piccolo effetto:  $\sim 20 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ )
  - Se piccoli  $\Delta T$  non servono compensazioni
  - Se grandi  $\Delta T$  va implementata una stabilizzazione del  $V_{bias}$  o della T
- Il **DC rate aumenta con T** (e viceversa: per  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$  il DC rate diminuisce del 50%)

