



# Università degli Studi di Torino

Facoltà di scienze M.F.N.  
Corso di laurea in Fisica di I livello

---

*Studio e caratterizzazione  
di fotorivelatori a stato solido  
basati su Si APD  
( Avalanche Photodiode )*

Relatore : prof. *Busso Luigi*

Candidato : *Pacher Luca*

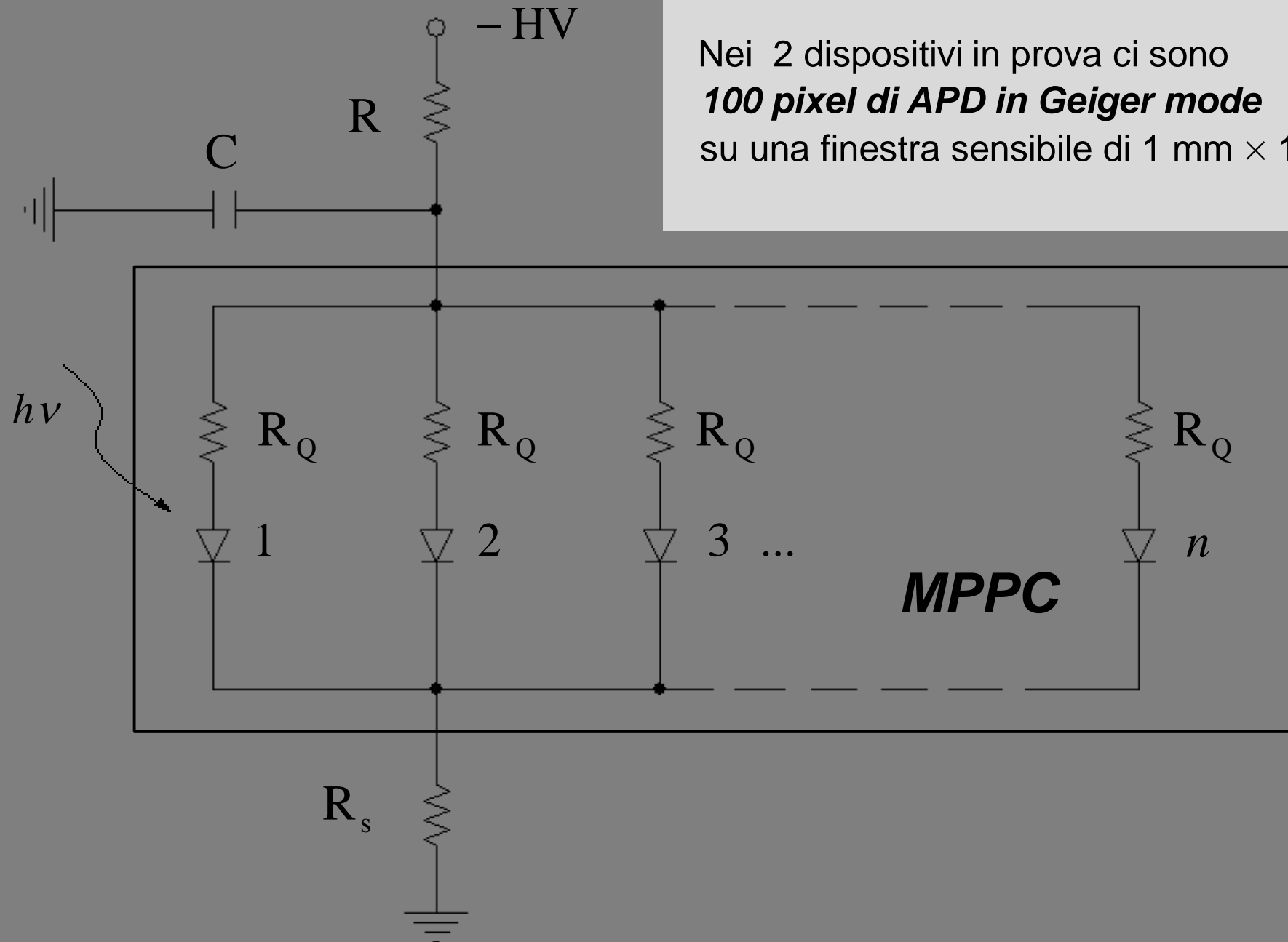
*Torino , 17 / 12 / 2009*

# Il rivelatore in esame (1)

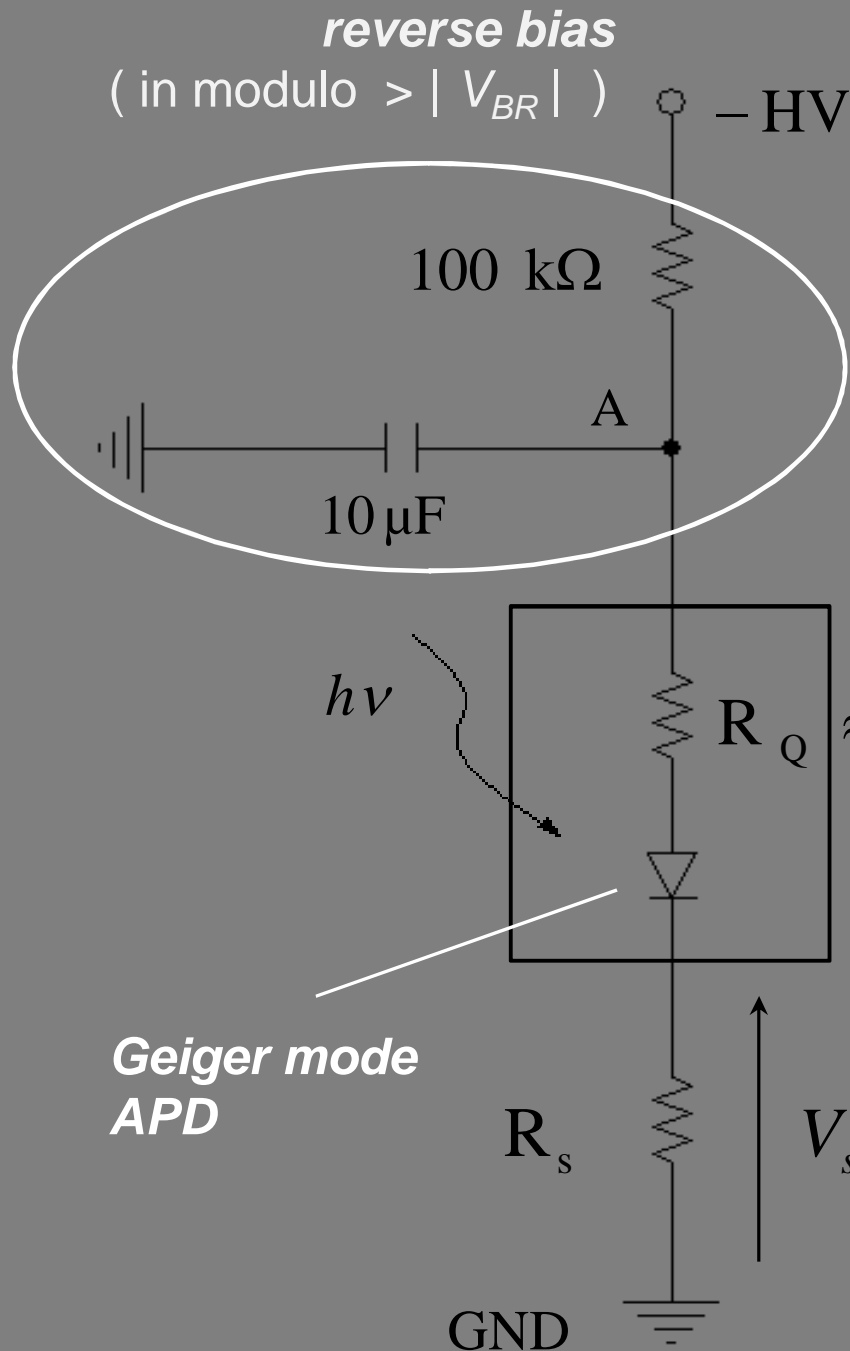
- *Fotorivelatore a stato solido* : dispositivo *a semiconduttore* in grado di convertire per *effetto fotoelettrico* un segnale ottico ( fotoni ) in un segnale di natura elettrica ( carica ) .
- *Multi Pixel Photon Counter ( MPPC )* della HAMAMATSU PHOTONICS ;
- una *matrice di celle ( pixel ) di APD ( Avalanche Photodiode ) operanti in regime Geiger ( Geiger mode )* .

# Il rivelatore in esame (2)

Nei 2 dispositivi in prova ci sono  
**100 pixel di APD in Geiger mode**  
su una finestra sensibile di  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$



# Circuito di polarizzazione (singola cella)



filtro *RC passa basso* sull'alimentazione ,  
serve sia da stabilizzatore sia da limitatore di  
corrente durante il ripristino del *Geiger mode*

resistenza in polisilicio integrata  
per lo spegnimento della corrente  
di valanga ( *quenching resistor* )

carico esterno sul quale  
prelevare il segnale (  $\sim 50 / 100 \Omega$  )

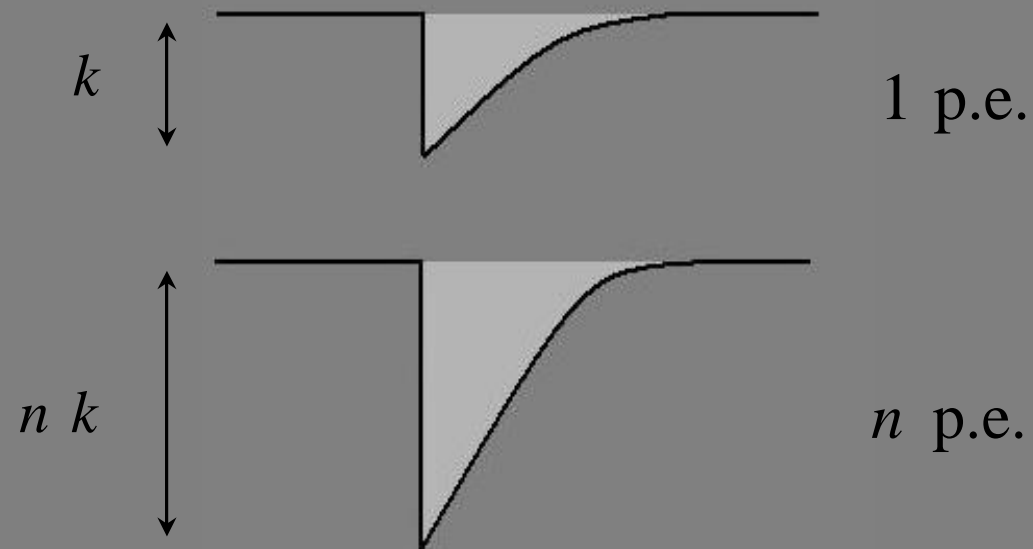
# Conteggio dei fotoni (1)

- Lavorando in regime Geiger, ciascuna cella in uscita dà *un impulso di corrente di valanga sempre della stessa ampiezza*, indipendentemente dal fatto che siano stati assorbiti uno o più fotoni contemporaneamente, quindi il dispositivo nel complesso è solo un *rivelatore di eventi* ( *trigger device* ) ;

➤ parleremo di ‘ **fotoelettrone** ’ ( **p.e.** ) per indicare in generale la risposta di una singola cella .

# Conteggio dei fotoni (2)

- Le celle sono però *collegate in parallelo* , quindi se vengono colpite 2 celle *distinte* il segnale sarà doppio e così via :



- Se la densità di celle è molto grande, mentre il numero di fotoni incidenti è molto basso ( debole sorgente luminosa ) , allora sarà molto probabile che vengano colpite solo celle distinte, quindi si potrà dire di avere rivelato *un singolo fotone* !

# Photon Detection Efficiency

L' *efficienza di rivelazione* di questi dispositivi può essere espressa in forma fattorizzata :

$$PDE = (1 - R_1)(1 - R_2) \times QE(\lambda) \times FF \times \varepsilon_{Geiger}$$

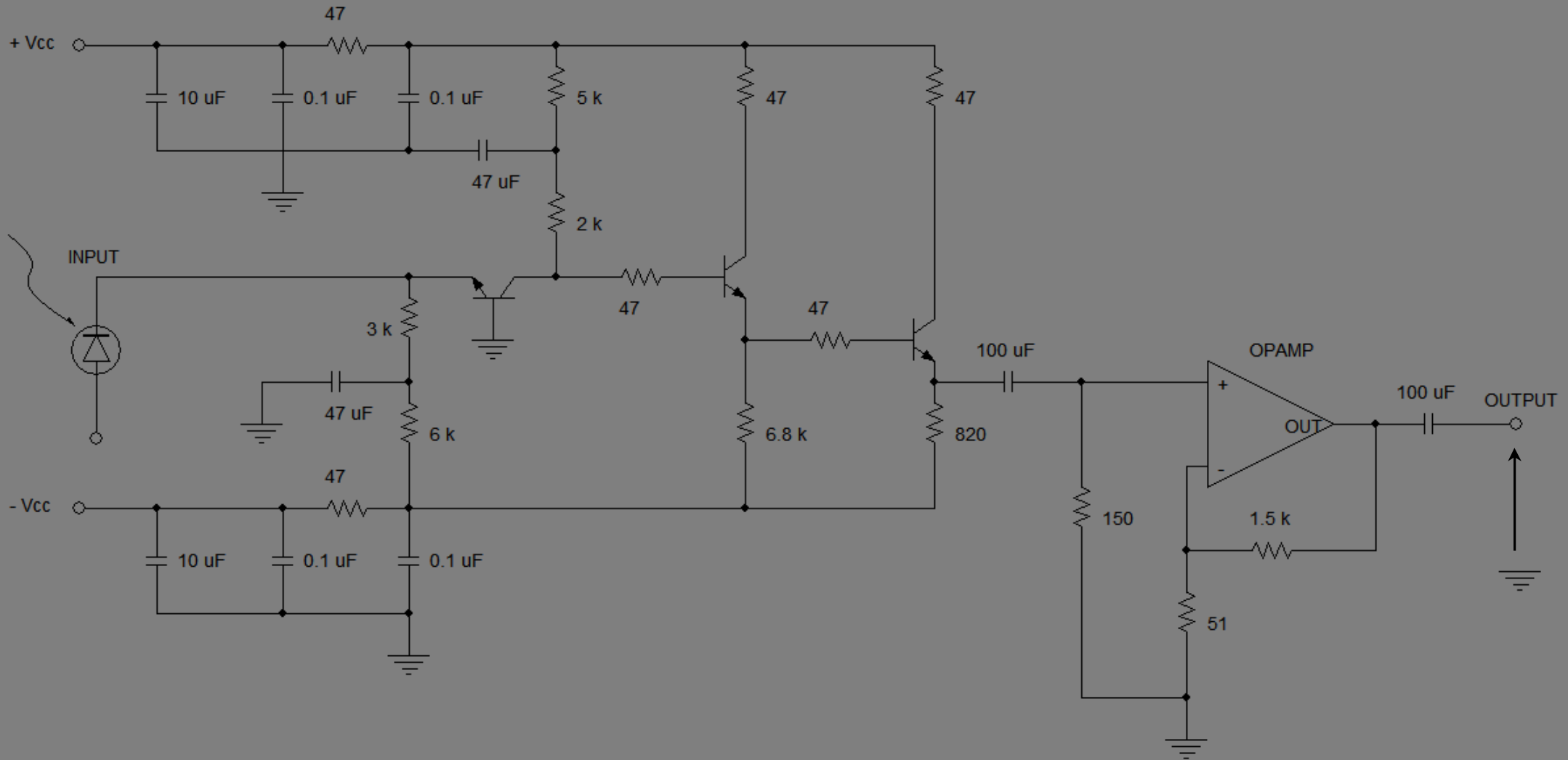
efficienza quantica

fill factor

trasmissione dei fotoni incidenti dall'aria al primo strato di SiO<sub>2</sub> e poi dall'ossido al silicio della giunzione

probabilità di valanga

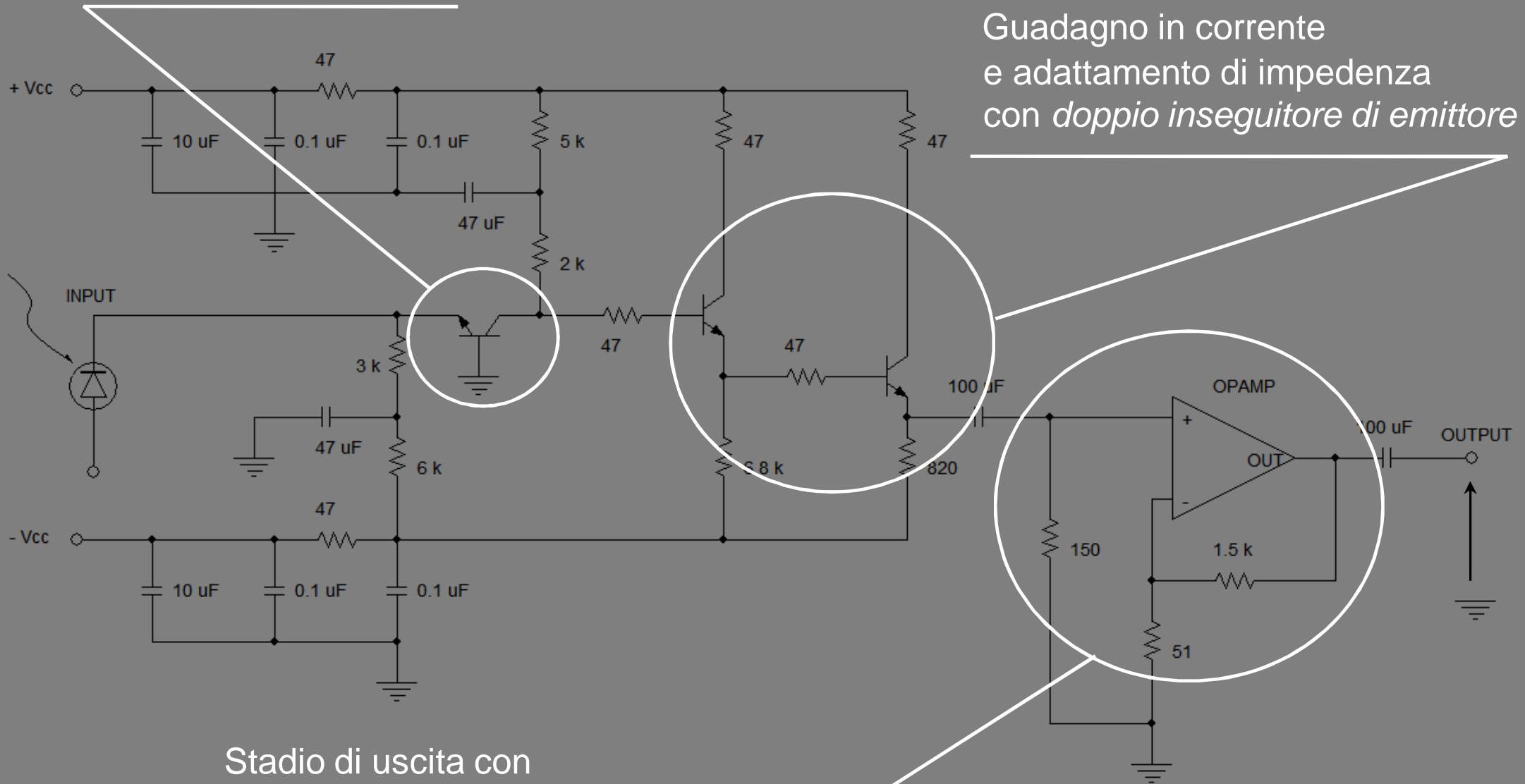
# Preamplificatore (1)





# Preamplificatore (1)

Ingresso a base comune

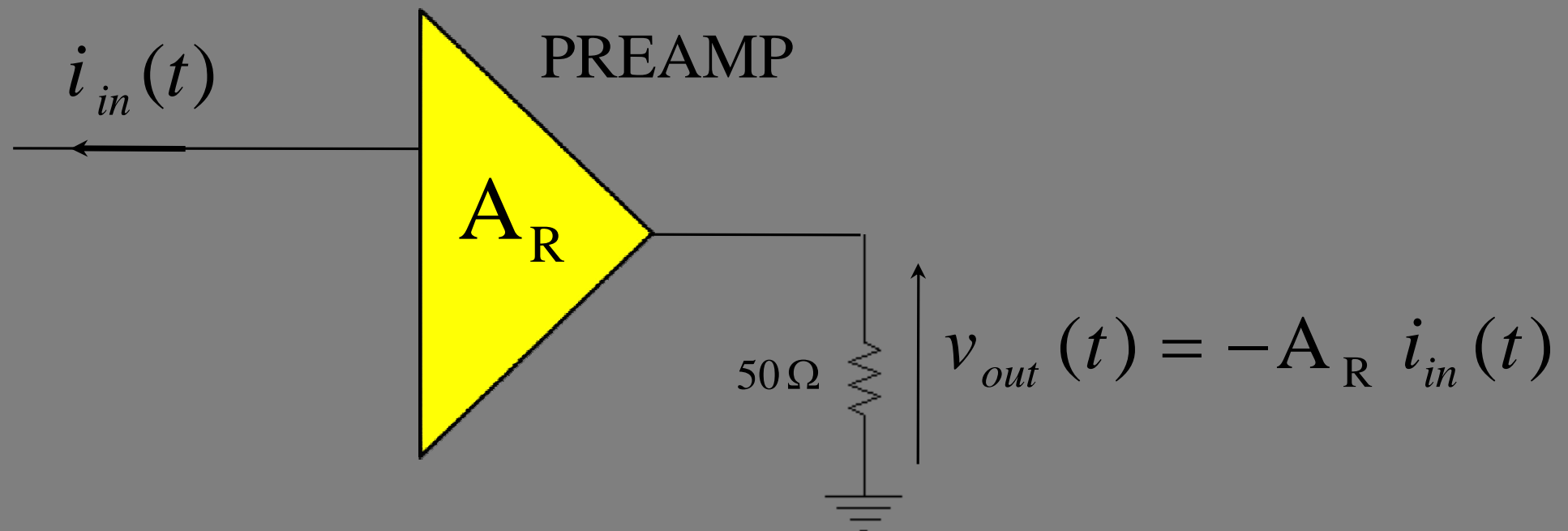


Guadagno in corrente  
e adattamento di impedenza  
con *doppio inseguitore di emittore*

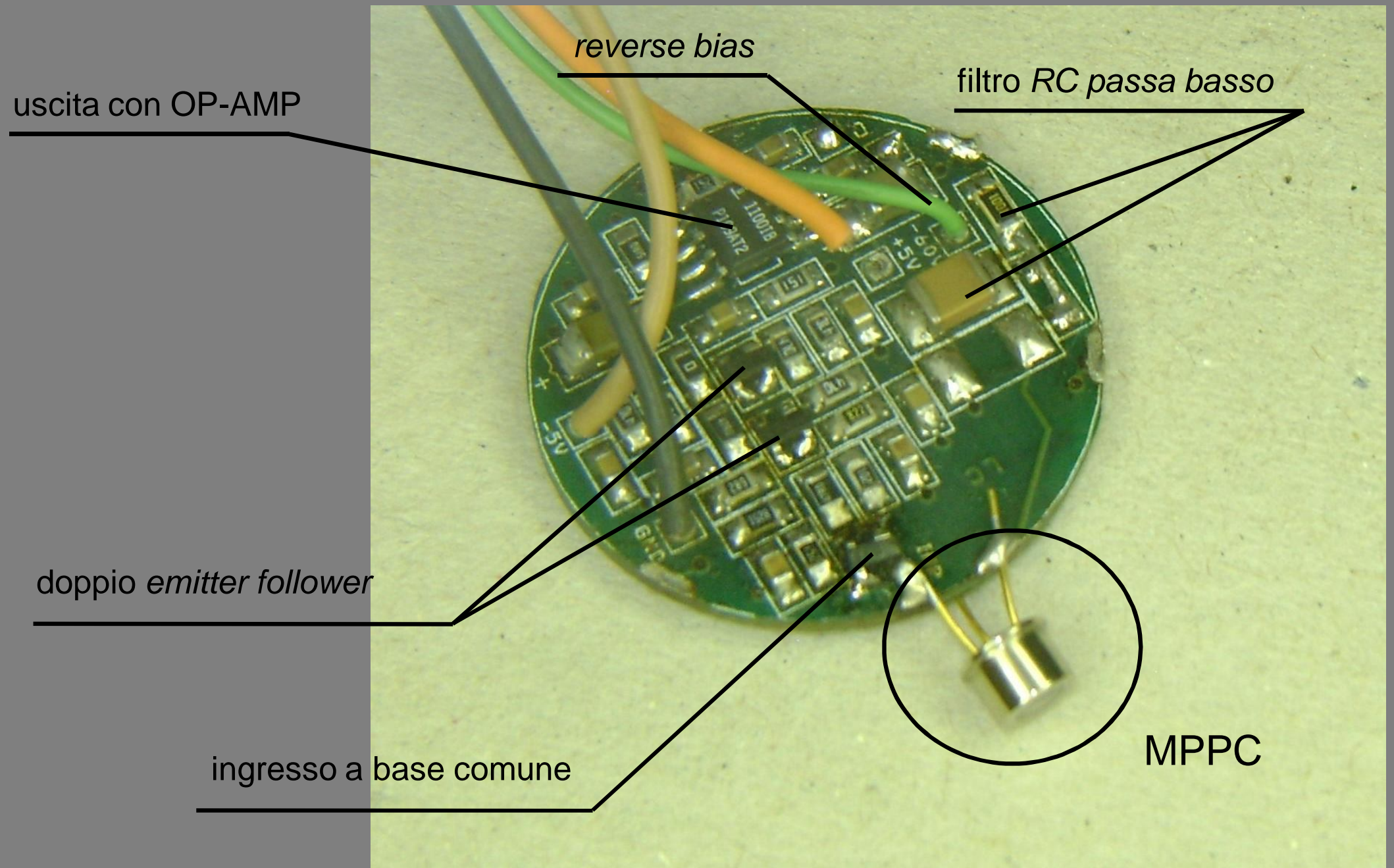
Stadio di uscita con  
OP-AMP non invertente

# Preamplificatore (2)

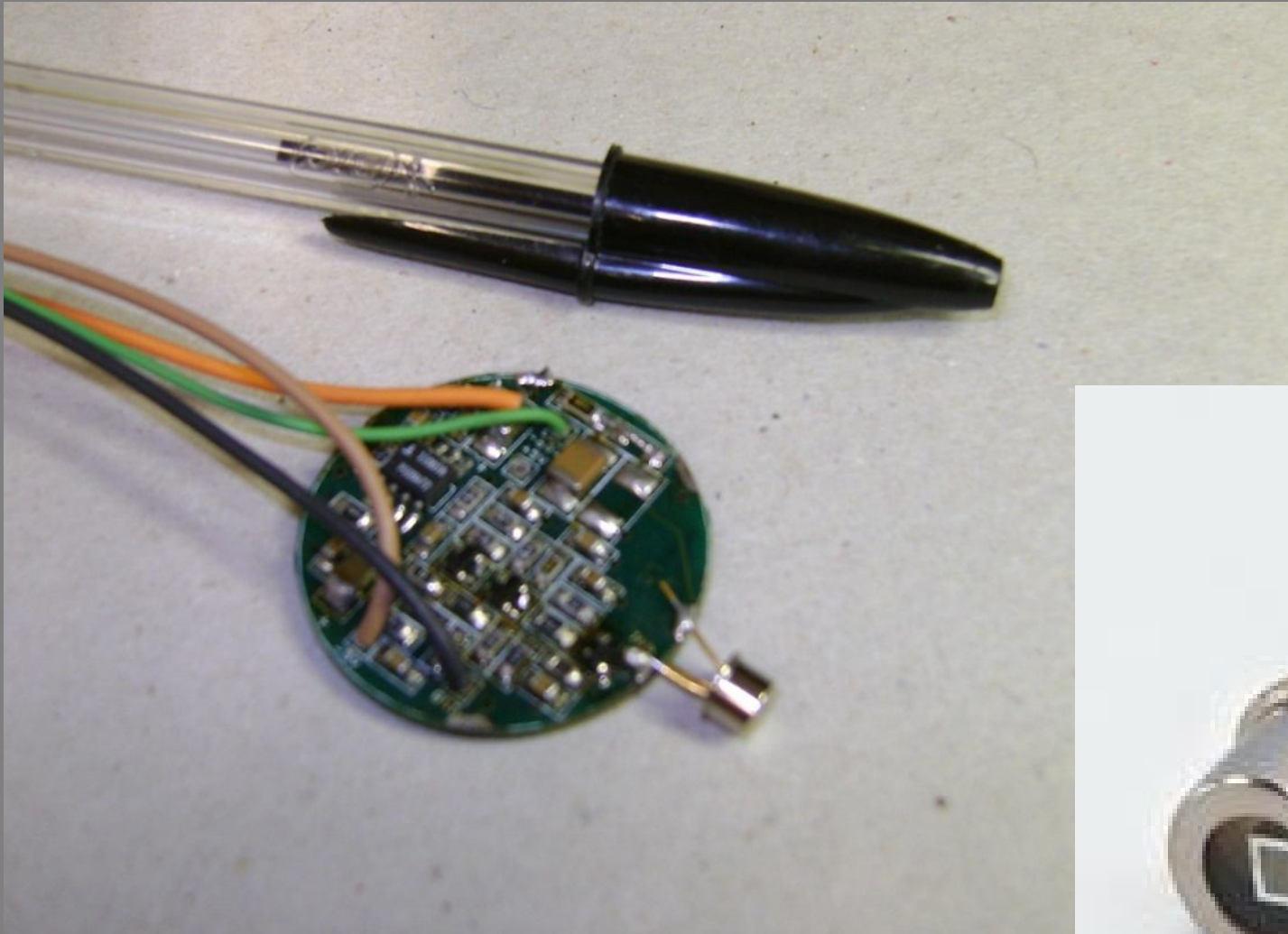
Nel complesso si può pensare di modellizzare il dispositivo semplicemente come *un amplificatore in transresistenza* di valore  $A_R$  [  $\Omega$  ], che riceve in ingresso un segnale in corrente e restituisce in uscita un segnale di tensione :



# Tornando alla realtà ...



# Le dimensioni effettive



# Qualche numerino

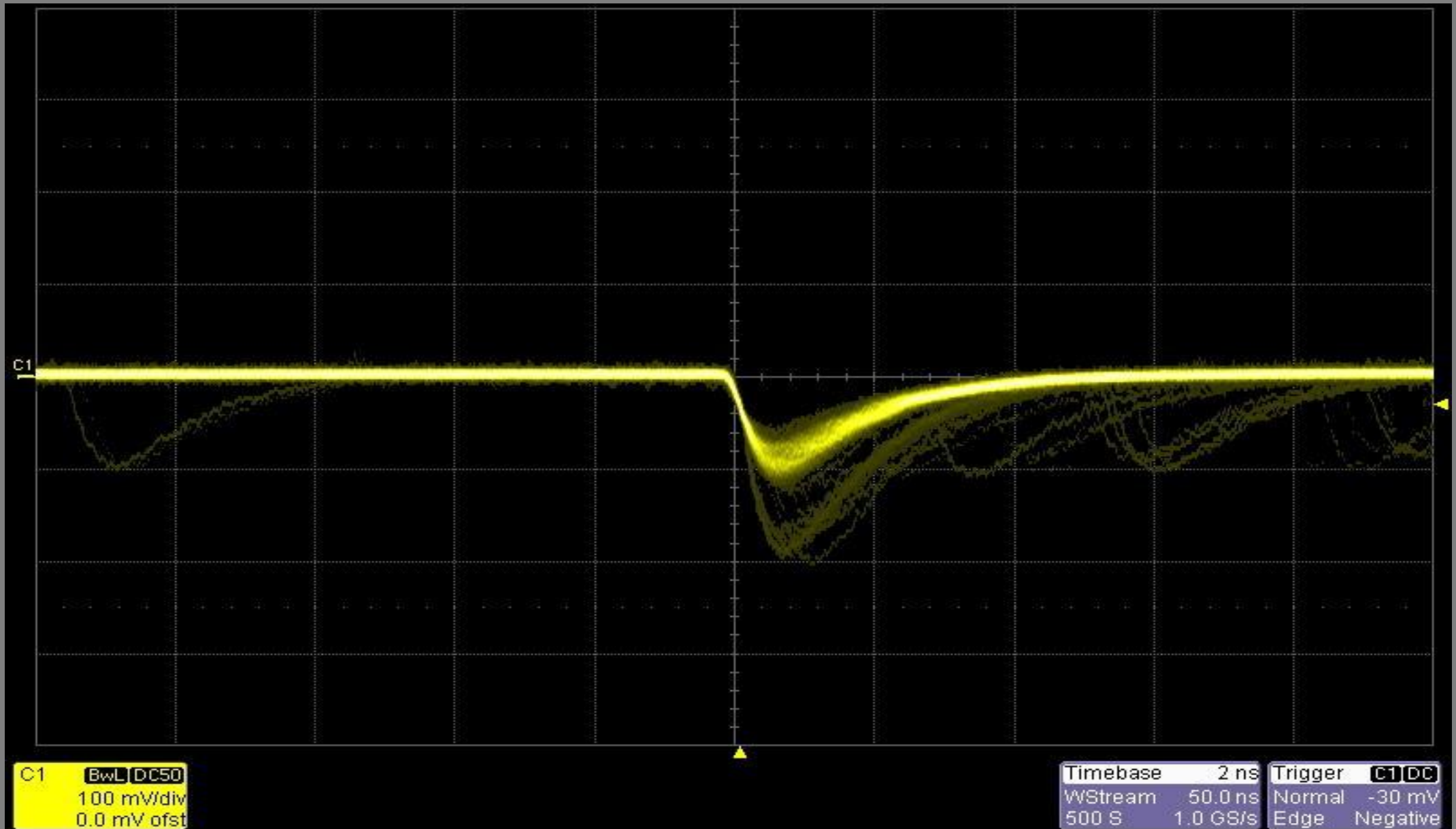
- dimensioni fisiche della finestra  $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$  ;
- area sensibile  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  , con un  $FF \approx 78.5 \%$  ;
- $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  l'area di ciascun pixel ; *es. calorimetria e  
luce Cherenkov  
in FNAE*
- sensibilità per  $320 \text{ nm} < \lambda < 900 \text{ nm}$  , con  $\lambda_p \approx 400 \text{ nm}$  ;
- $PDE \approx 65 \%$  con una  $QE \approx 70 \%$  ; percentuali migliori  
dei PMT tradizionali !
- HV  $\sim -70 \text{ V}$  ma con elevati guadagni in carica ,  $M \sim 10^5 - 10^6$



**Setup sperimentale**

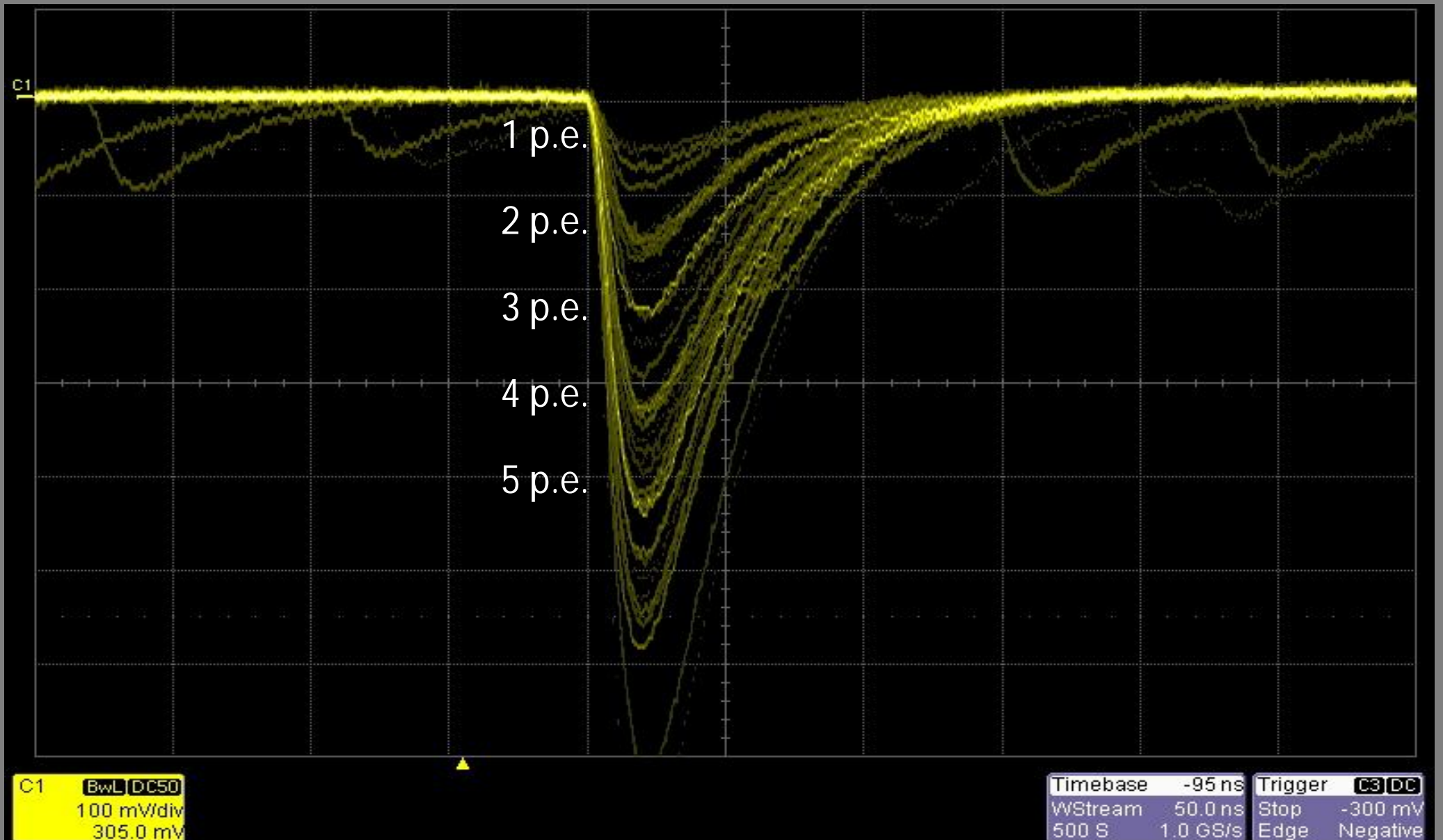
***Risultati  
sperimentali***

# Cosa si osserva sull'oscilloscopio (1)

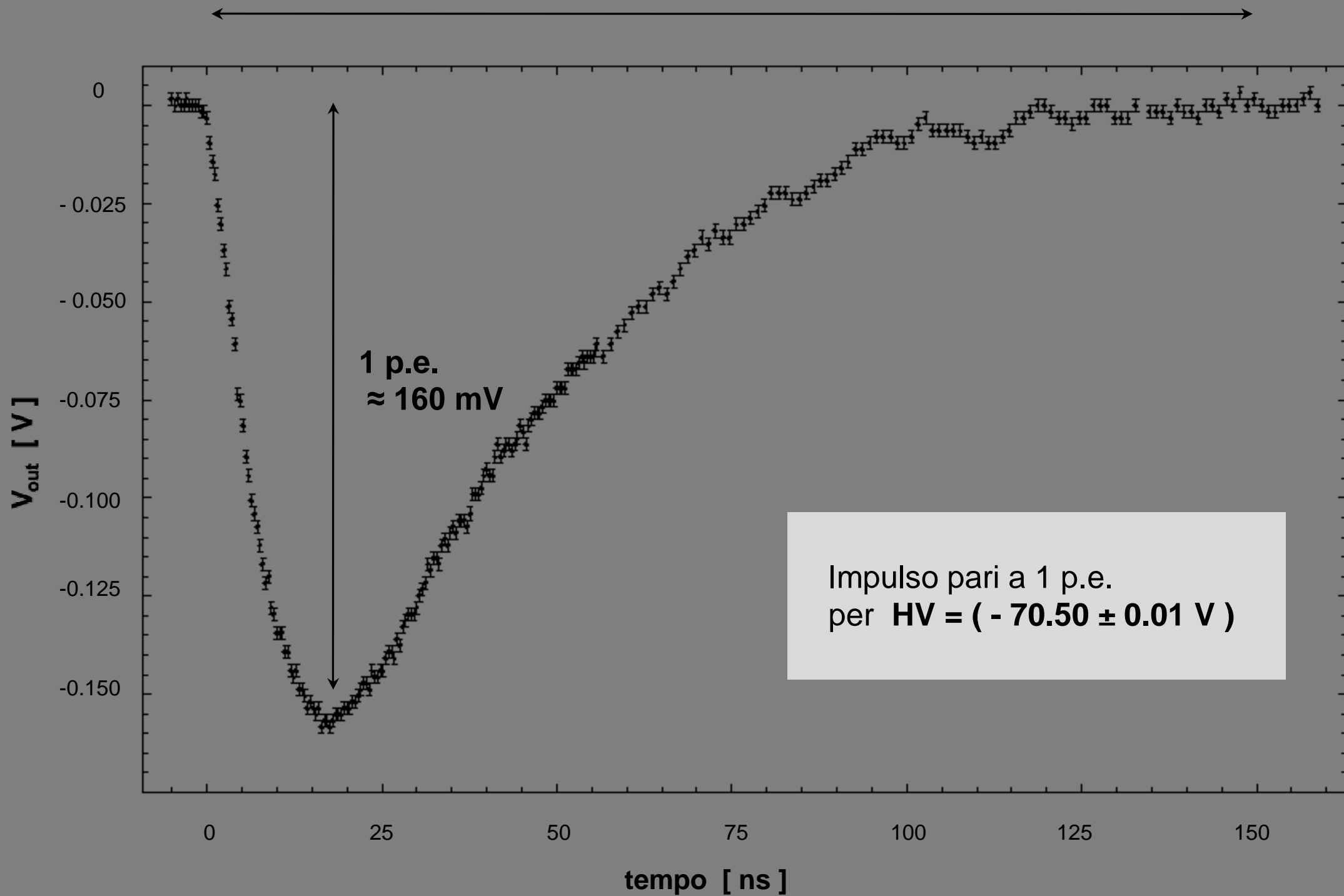


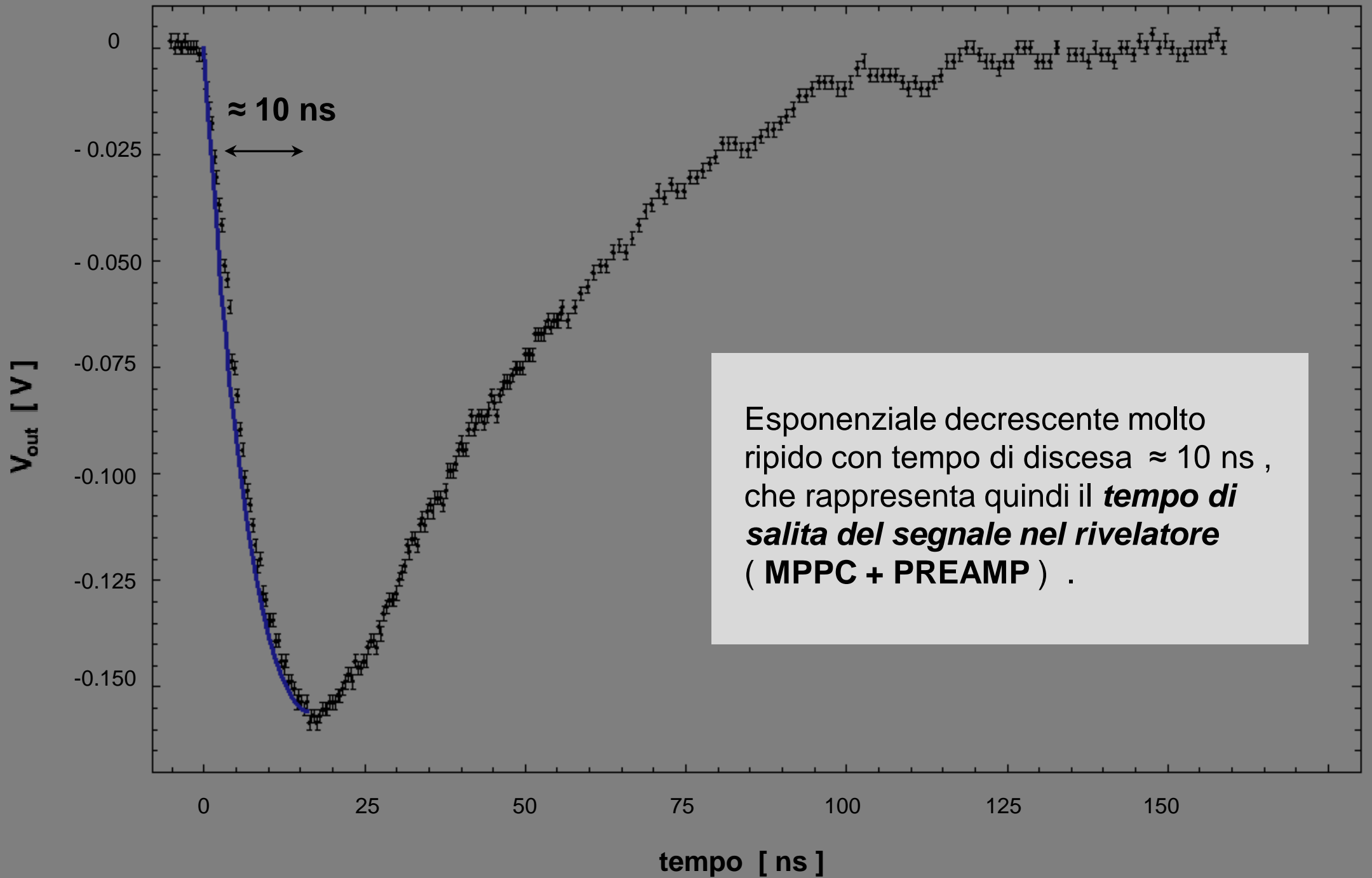


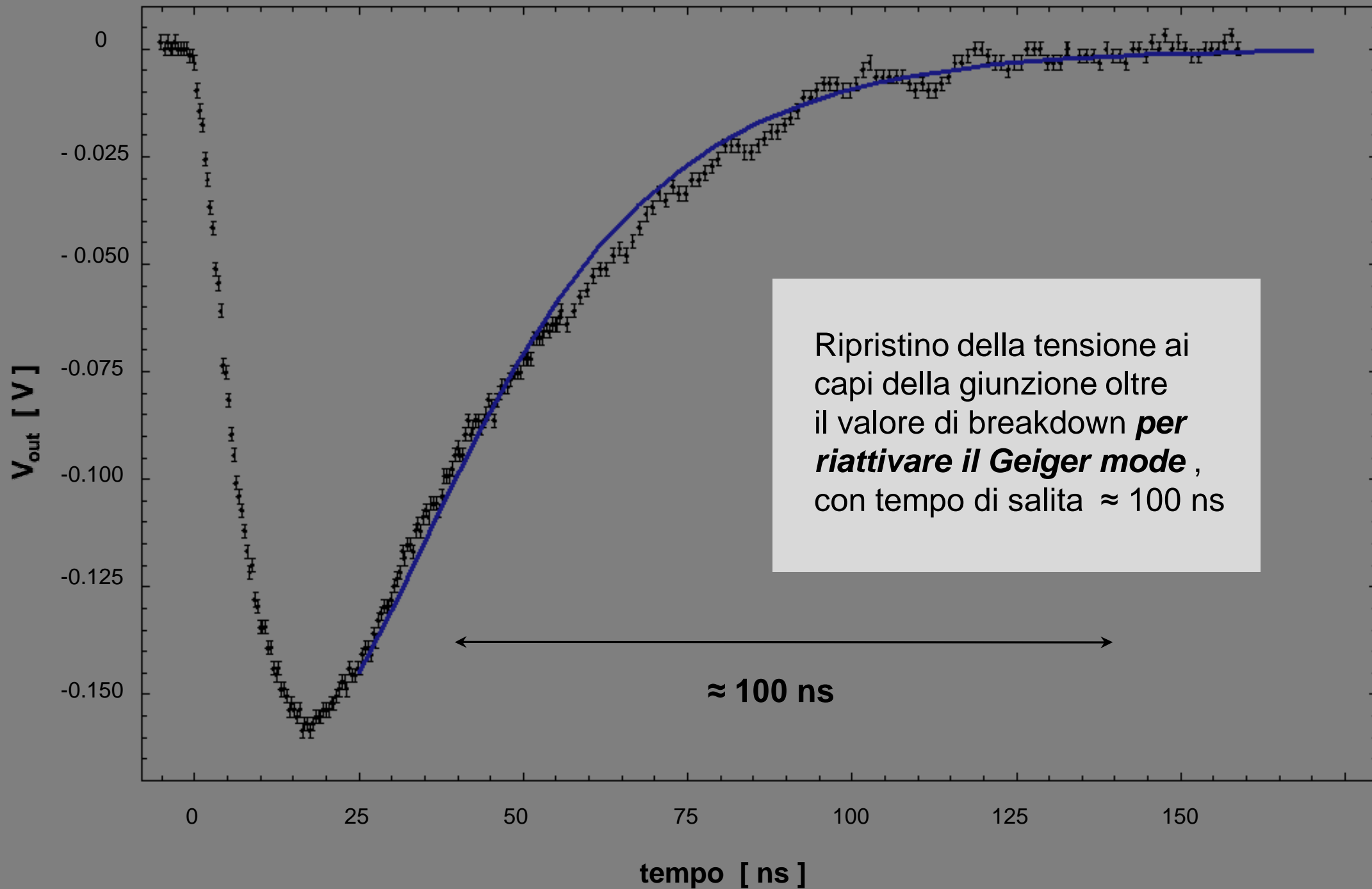
# Cosa si osserva sull'oscilloscopio (2)



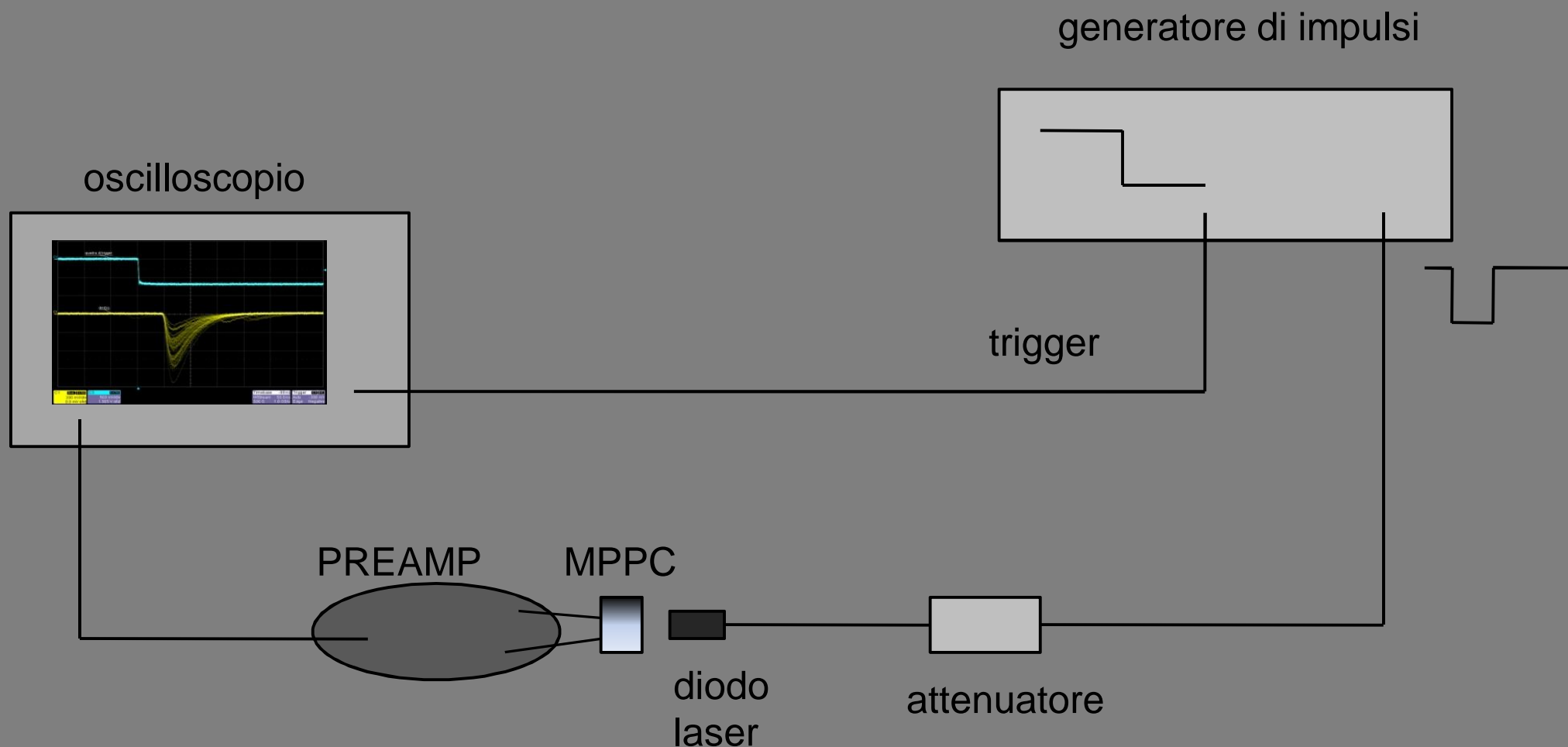
$\approx 150$  ns



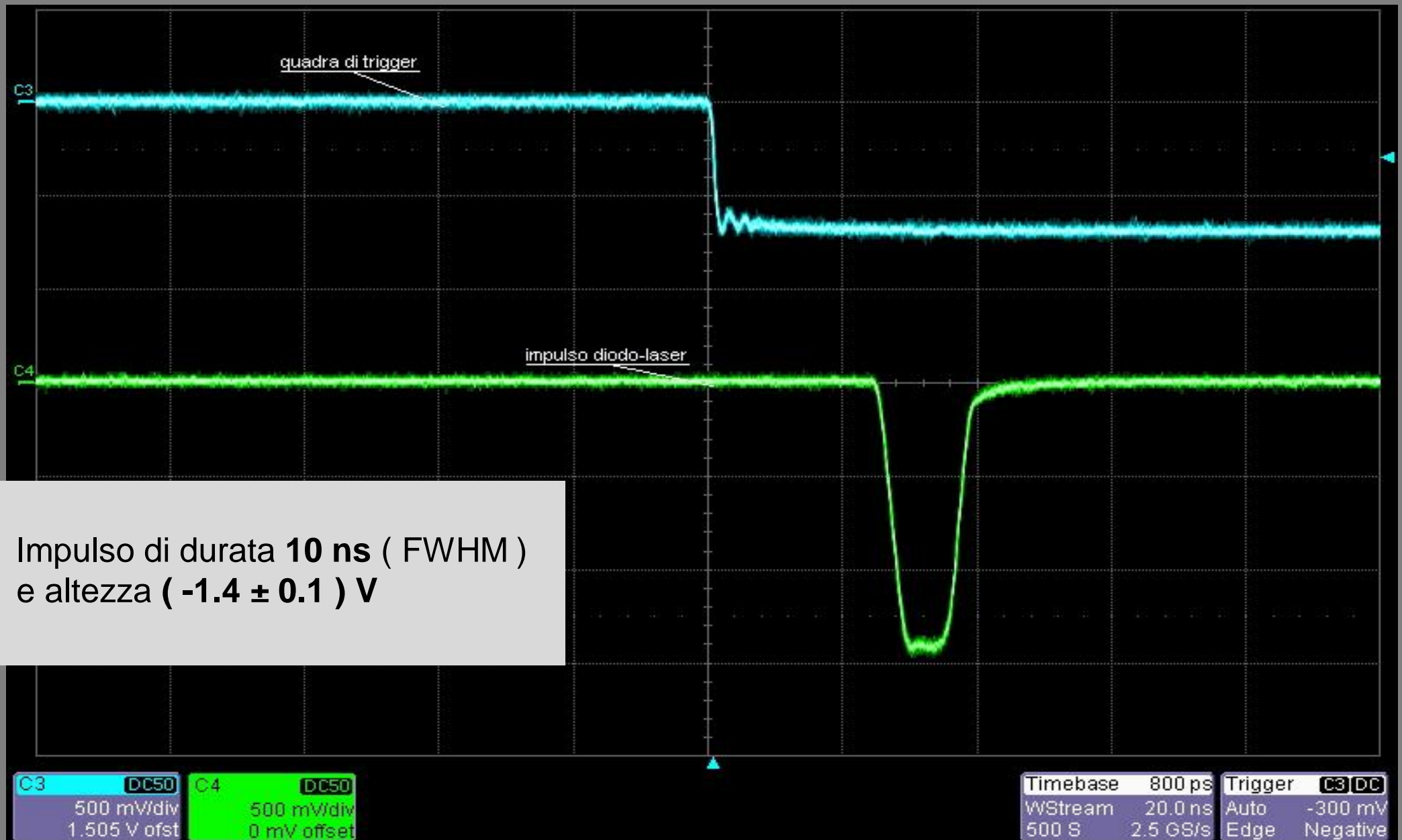




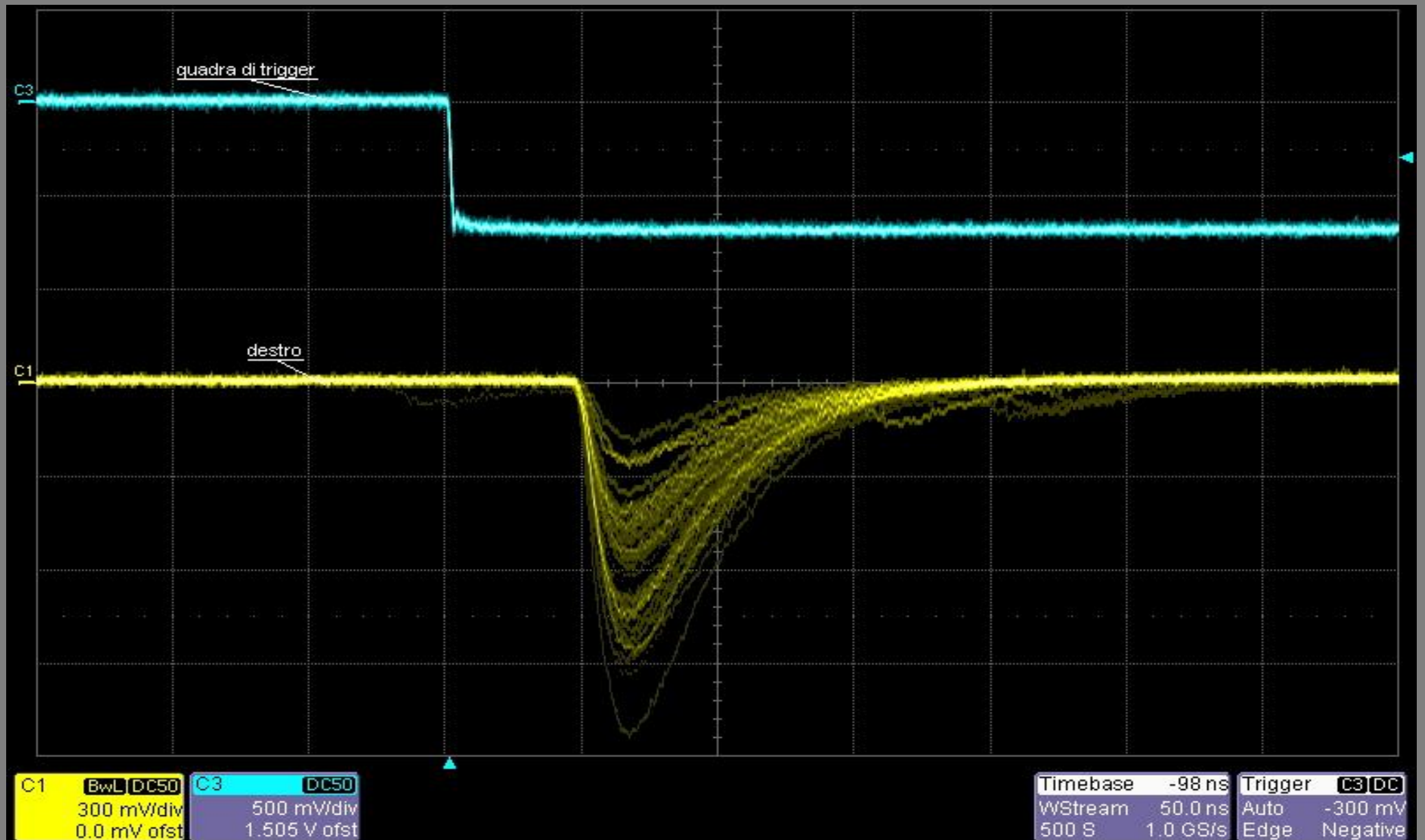
# Risposta ad un impulso luminoso (1)



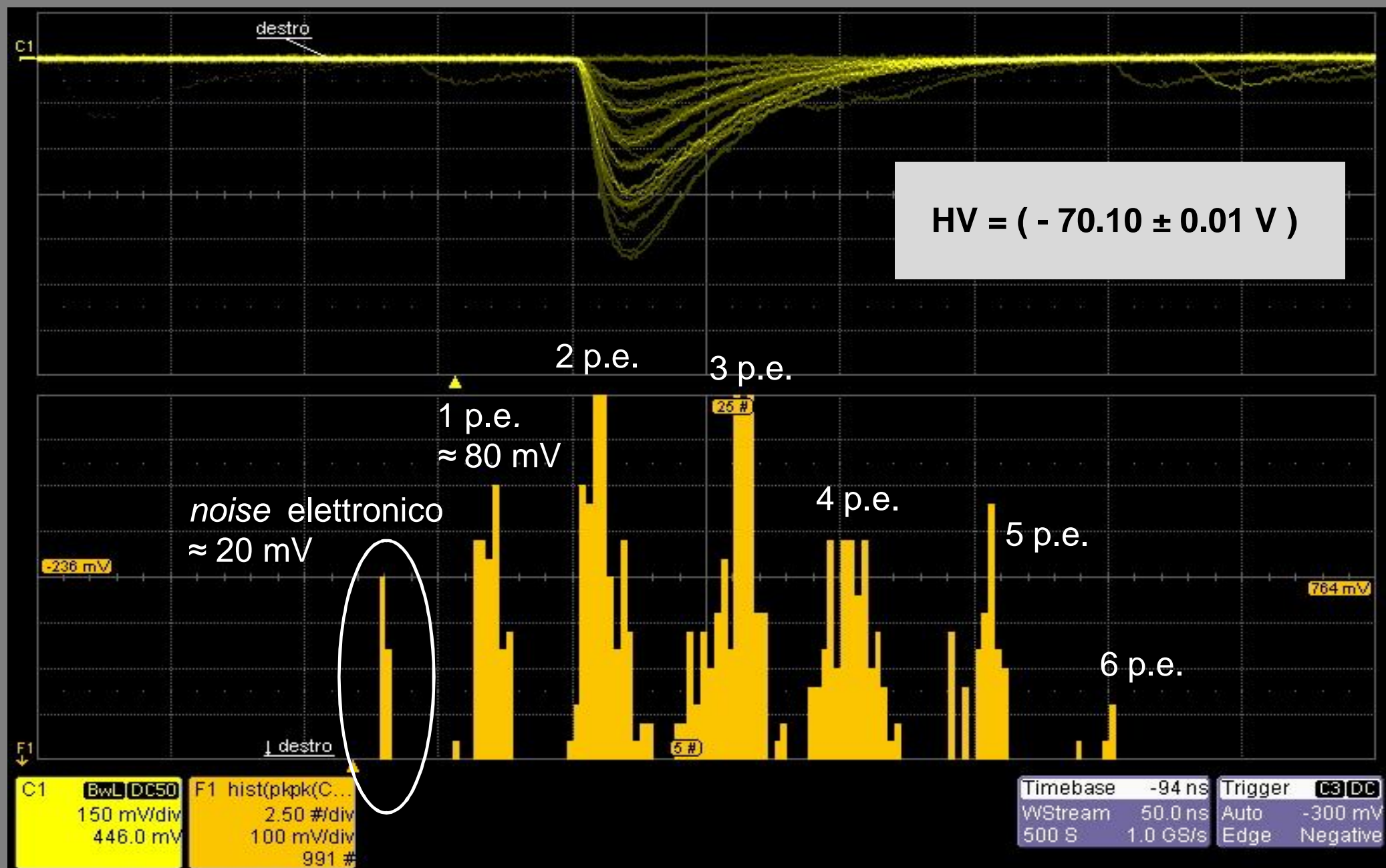
# Risposta ad un impulso luminoso (2)



# Risposta ad un impulso luminoso (3)



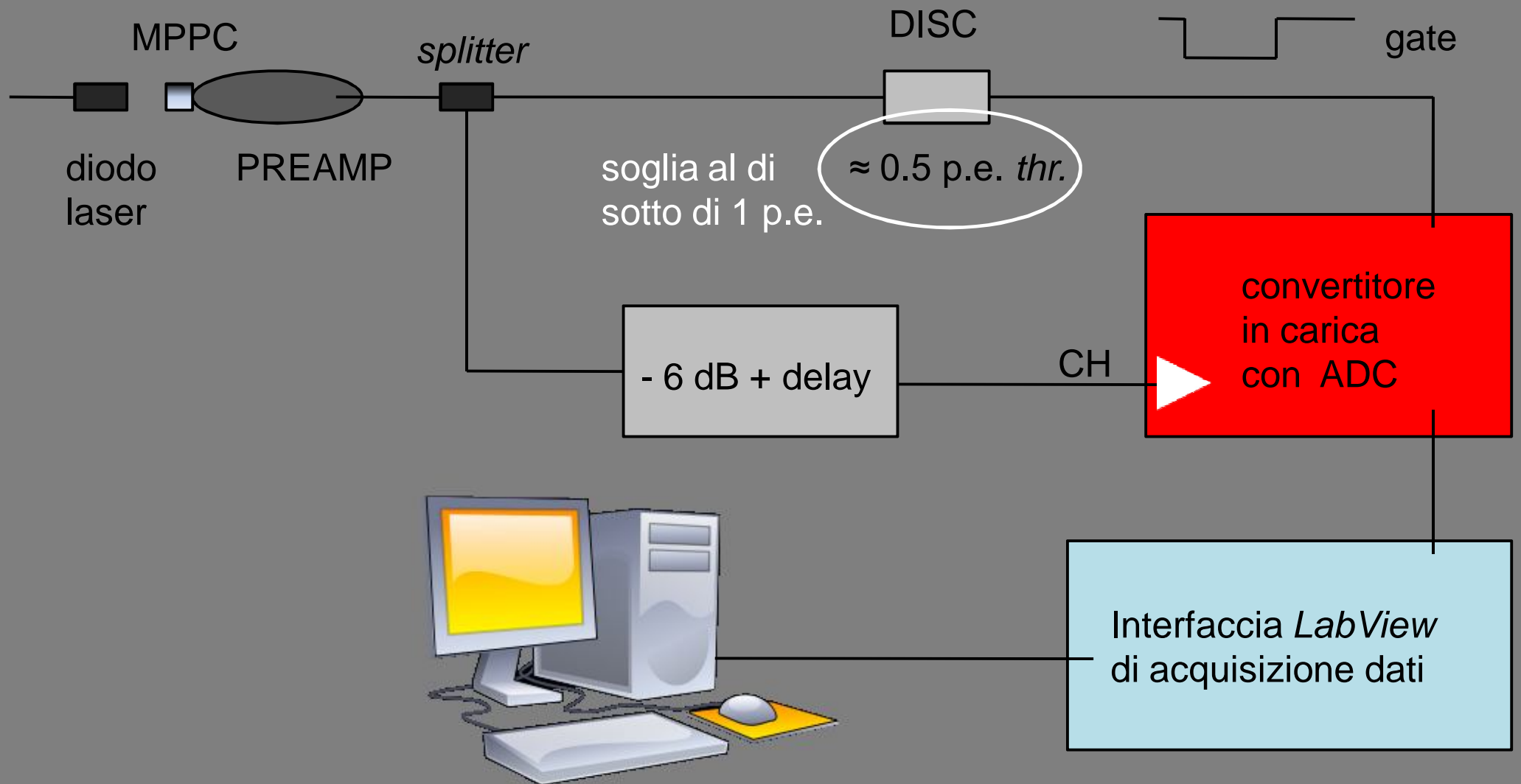
# Spettro in tensione





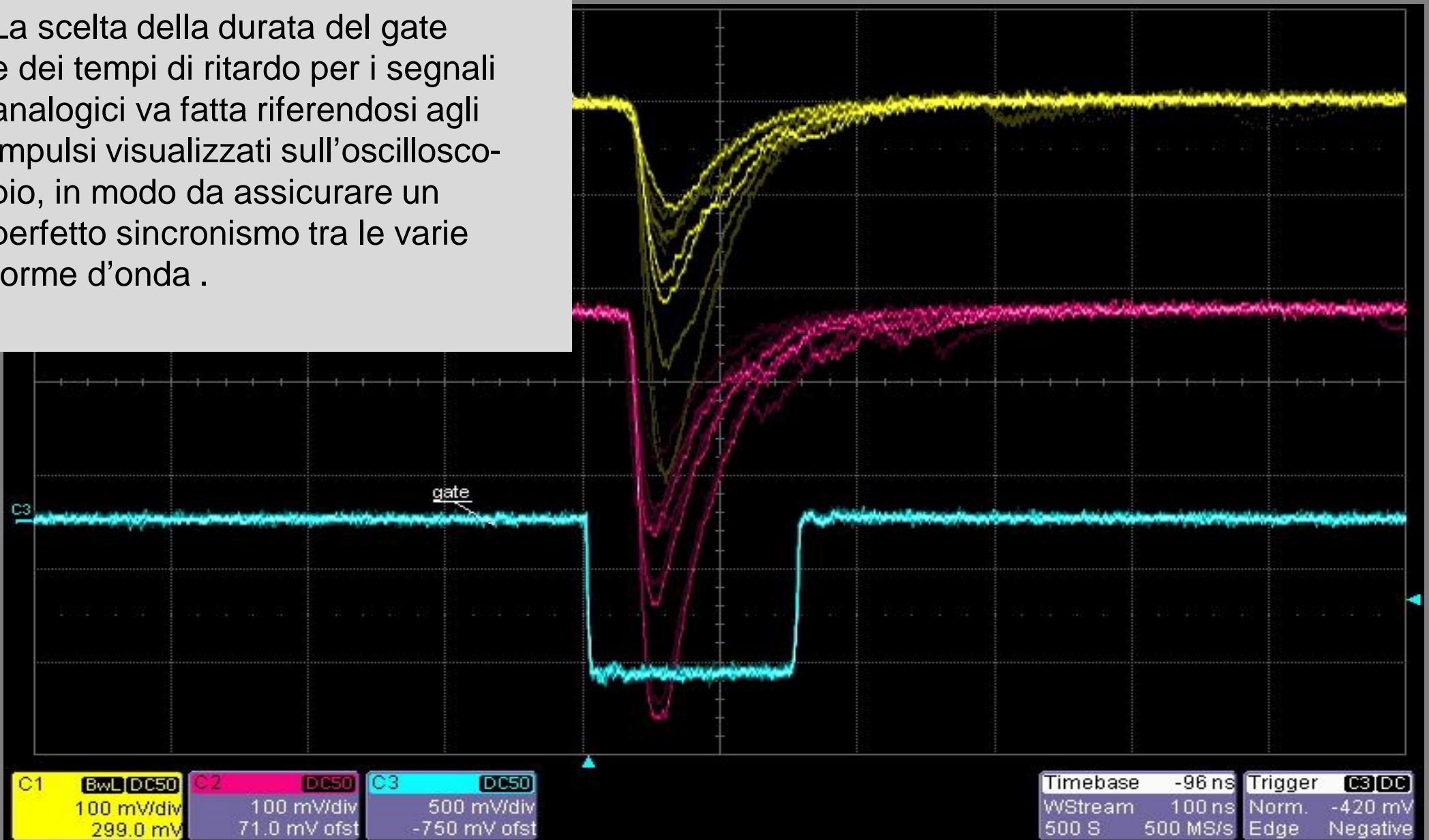
# Acquisizione ADC in carica

La carica è ottenuta *integrando la tensione analogica* mandata in ingresso all'ADC :



# Gate di integrazione

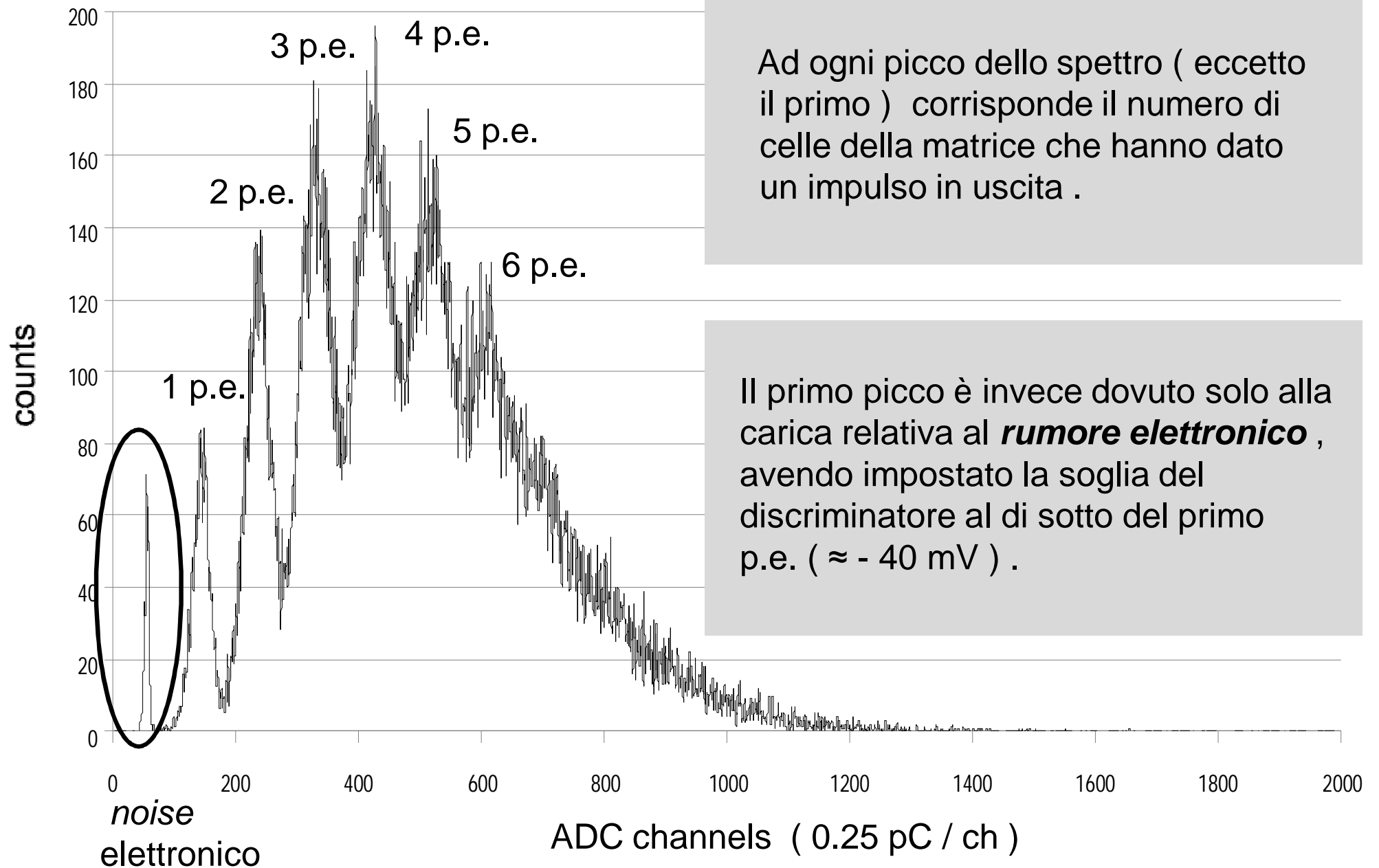
La scelta della durata del gate e dei tempi di ritardo per i segnali analogici va fatta riferendosi agli impulsi visualizzati sull'oscilloscopio, in modo da assicurare un perfetto sincronismo tra le varie forme d'onda .



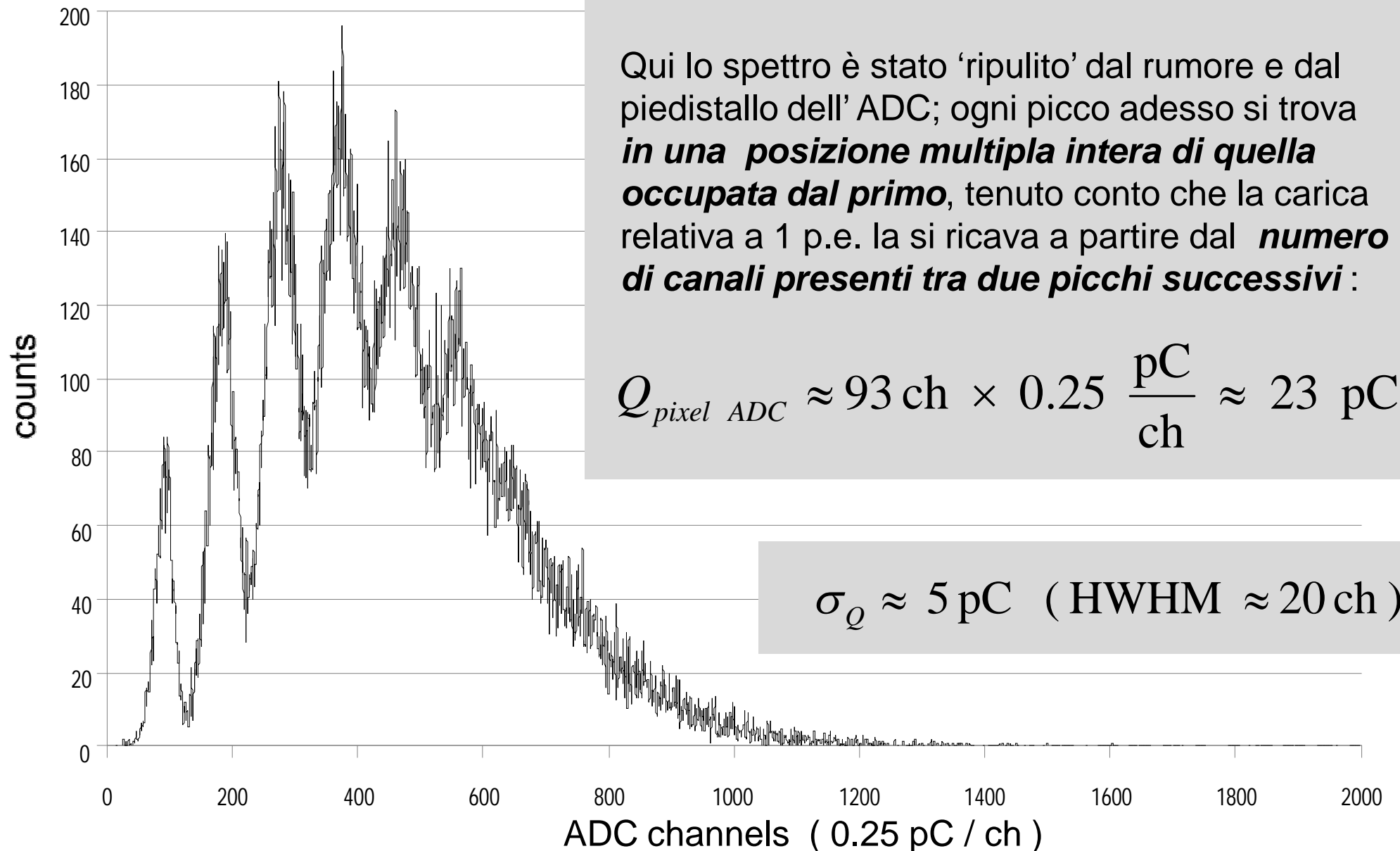
# Acquisizione della carica

- L'informazione sulla carica viene convertita da un ADC a 4096 canali ( 12 bit ) , quindi a ciascun canale corrisponde un dato valore di carica multiplo del fattore di quantizzazione ( 0.25 pC / ch ) .
- L'operazione di integrazione viene poi ripetuta per ogni evento che supera la soglia del discriminatore e tramite *software LabView* i conteggi rilevati in ciascun canale vengono istogrammati, ottenendo uno *spettro in carica* .

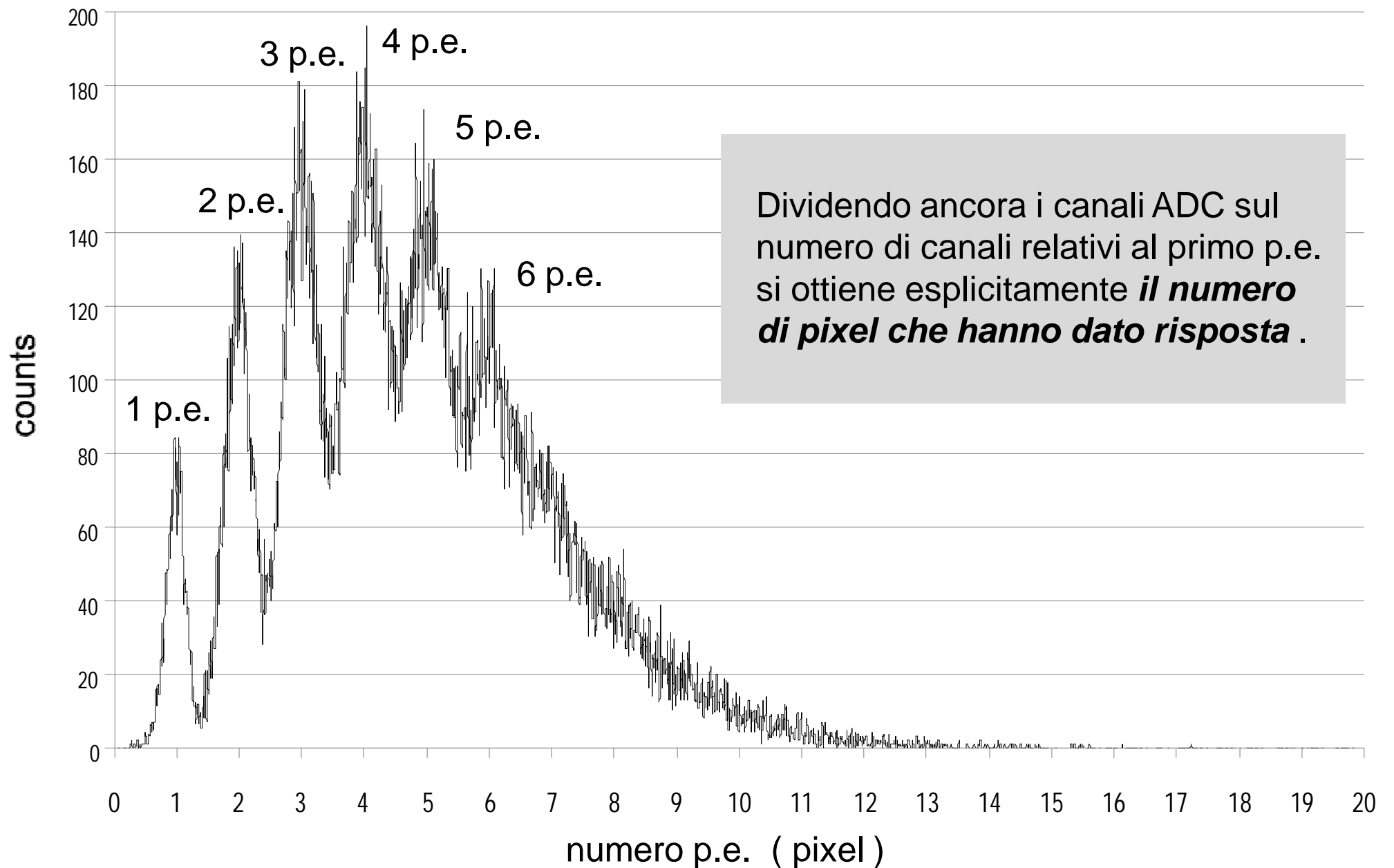
# Spettro in carica (1)



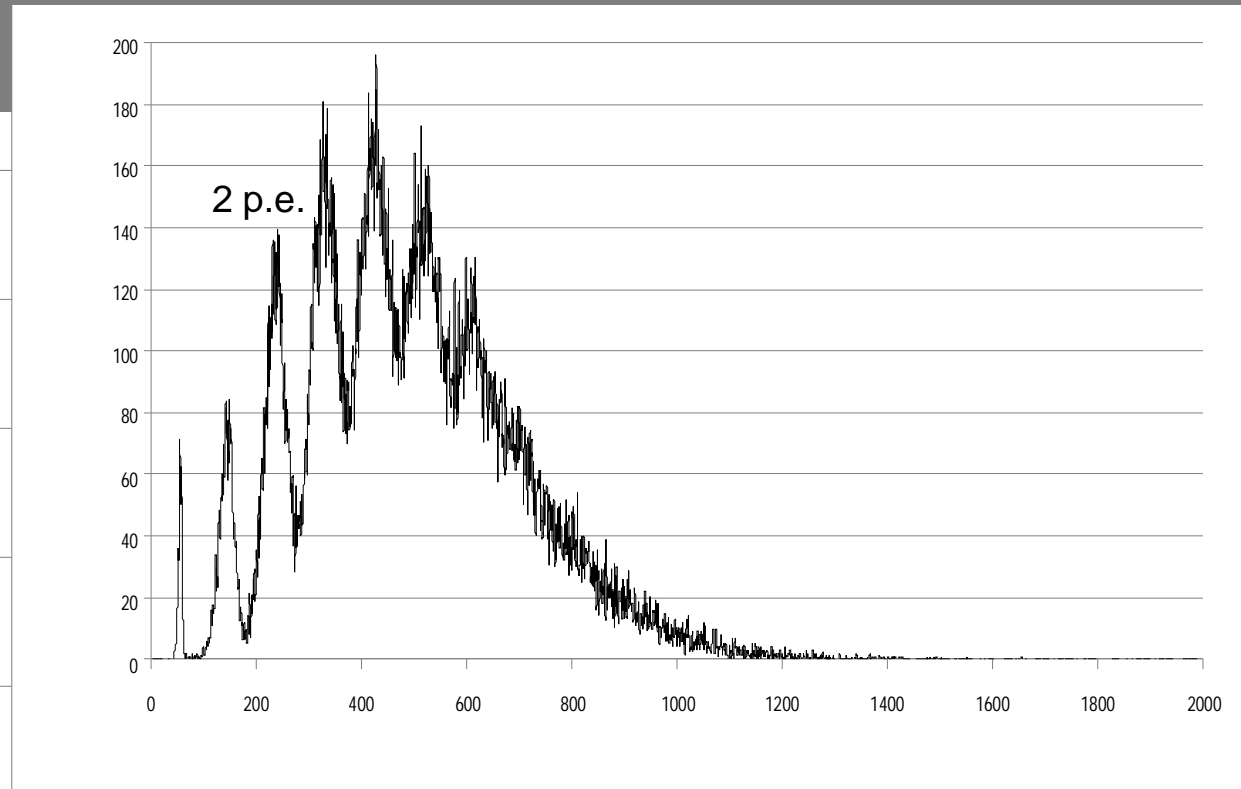
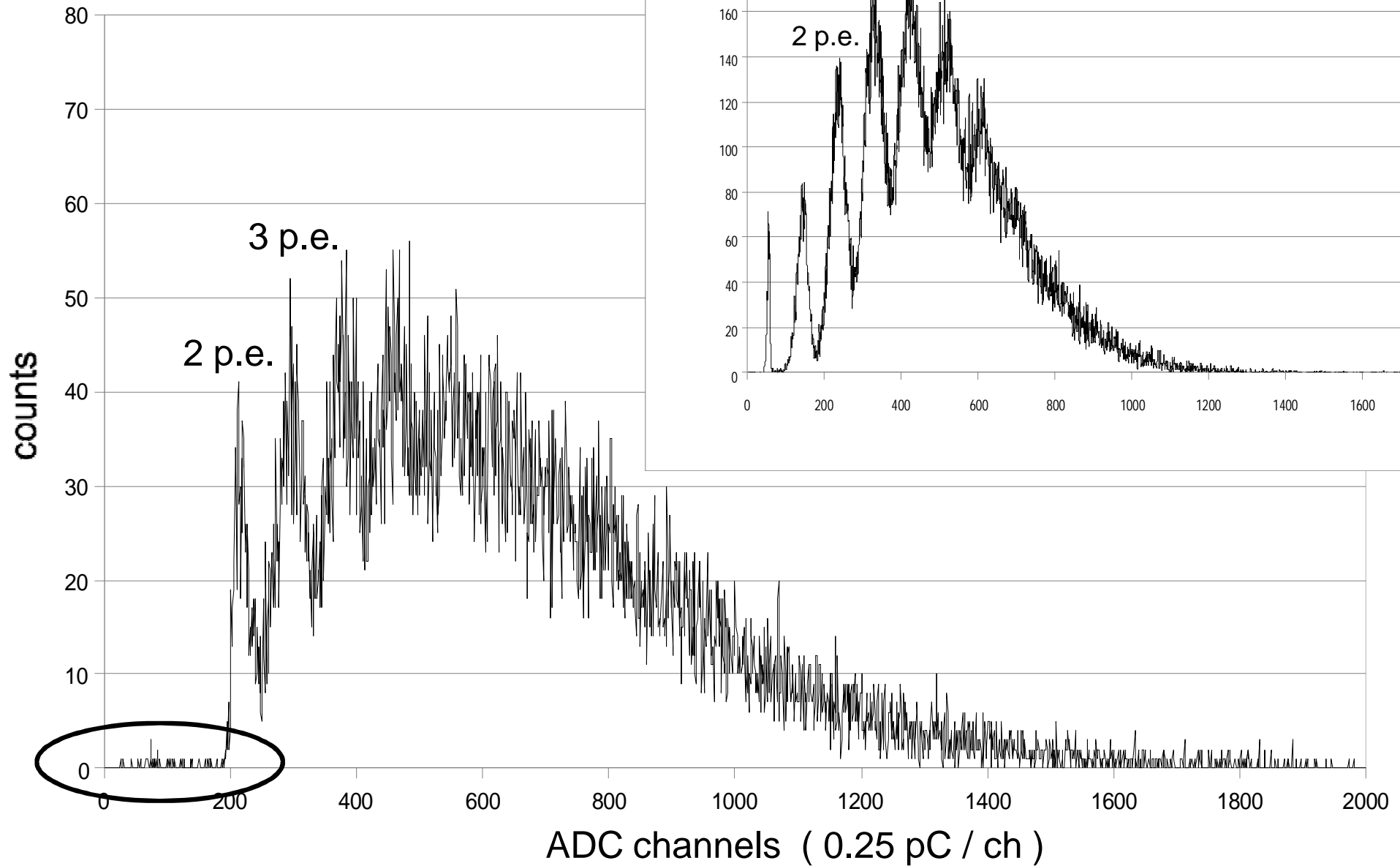
# Spettro in carica (2)



# Rinormalizzazione



# Soglia oltre 1 p.e. ( - 130 mV )



# Calcolo del guadagno

Il *guadagno in carica di una singola cella* è poi definito come la carica in uscita da un pixel durante una valanga normalizzata sulla carica elementare :

$$M = \frac{Q_{pixel}}{e}$$

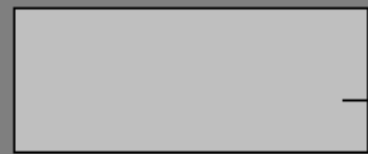
Per misurarlo è necessario però stimare il guadagno della sola catena elettronica utilizzata per le misure tramite ADC ( splitter, attenuazioni volute, moduli di delay e cavi coassiali, incluso il PREAMP) , essendo :

$$Q_{pixel\ ADC} = A_Q Q_{pixel}$$

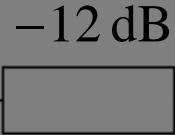


# Misura della transresistenza del PREAMP (1)

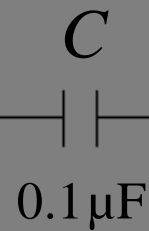
generatore di impulsi



-1 V  
48 ns



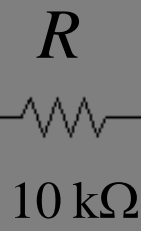
$50\ \Omega$



$0.1\ \mu\text{F}$

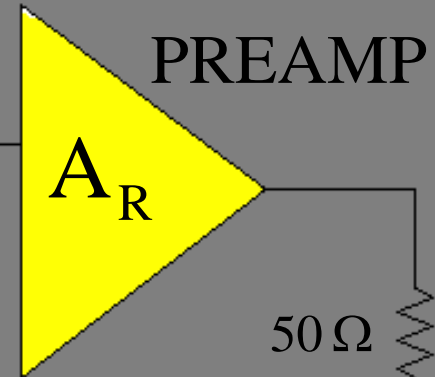


$V_{in\ PREAMP}$



$10\ \text{k}\Omega$

$I_{in}$

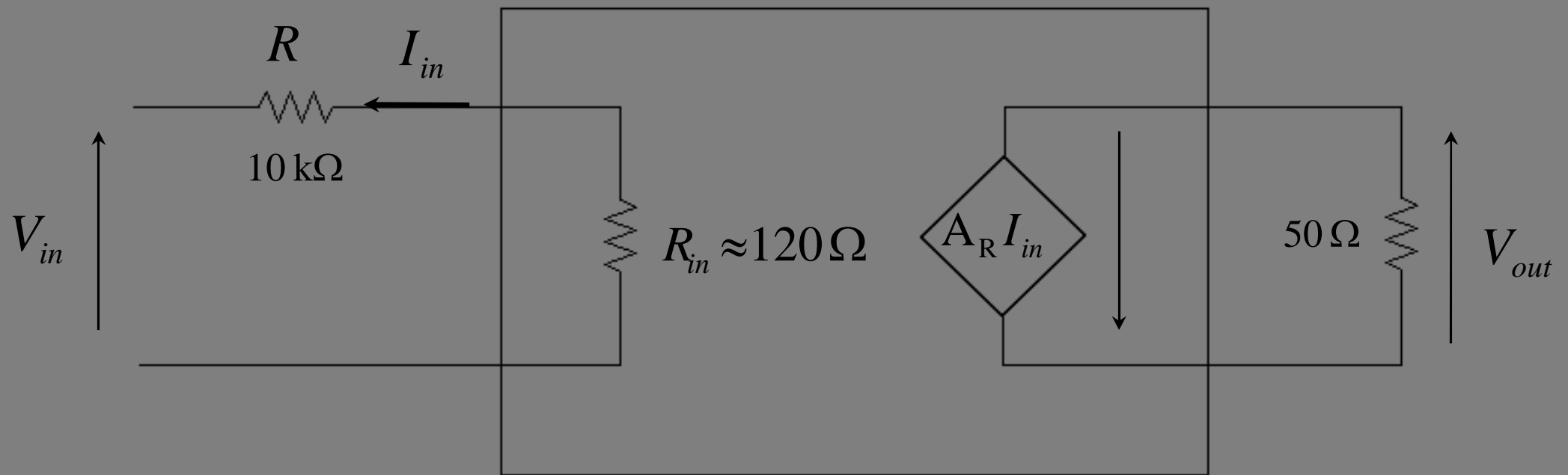


$50\ \Omega$



$V_{out}$

# Misura della transresistenza del PREAMP (2)



$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R + R_{in}} \approx \frac{V_{in}}{R} = \frac{250\text{ mV}}{10\text{ k}\Omega} = 25\text{ }\mu\text{A}$$

$$V_{out} = -A_R I_{in}$$

# Misura della transresistenza del PREAMP (3)

$$A_R = \frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{V_{out}}{\left(\frac{V_{in}}{R}\right)} = \left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) R$$

Sperimentalmente si misura :  $V_{out \text{ PREAMP}} \approx 650 \text{ mV}$

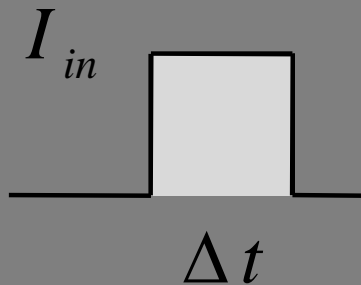
$$A_R \approx \left(\frac{650 \text{ mV}}{250 \text{ mV}}\right) 10 \text{ k}\Omega = 26 \text{ k}\Omega$$

**transresistenza  
del PREAMP**

# Guadagno in carica dell'elettronica

$$Q_{out\ ADC} \approx \overset{\delta_{ch}}{600\ ch} \times 0.25 \frac{pC}{ch} = 150\ pC$$

Ricordando che in ingresso al PREAMP si ha un impulso di corrente :



$$Q_{in\ PREAMP} = I_{in} \Delta t = 25\ \mu A \times 48\ ns = 1.2\ pC$$

$$A_Q = \frac{Q_{out\ ADC}}{Q_{in\ PREAMP}} = \frac{150\ pC}{1.2\ pC} = 125$$

**amplificazione in carica della catena elettronica**

# Guadagno in carica di una singola cella

Una volta caratterizzato il contributo dell'elettronica si può calcolare il guadagno di una singola cella del dispositivo :

$$Q_{pixel} = \frac{Q_{pixel\ ADC}}{A_Q} = \frac{23\text{ pC}}{125} \approx 0.2\text{ pC}$$

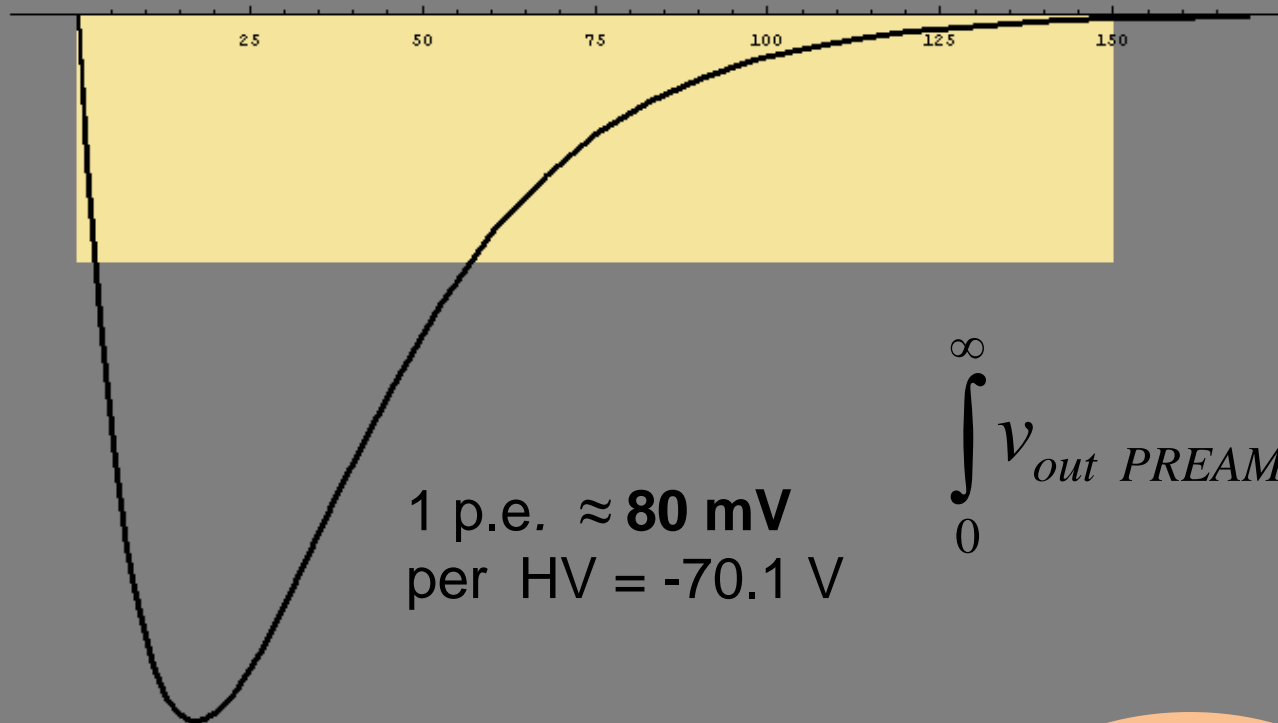
$$M = \frac{Q_{pixel}}{e} = \frac{0.2 \times 10^{-12}}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 1.2 \times 10^6$$

guadagno di una singola cella

( però HV = - 70.10 V e temperatura ambiente ! )

# In alternativa ...

$$Q_{pixel} = \int_0^{\infty} i_{in \text{ PREAMP}} dt = - \frac{1}{A_R} \int_0^{\infty} v_{out \text{ PREAMP}} dt$$



$$\langle v_{out} \rangle \approx \frac{1 \text{ p.e.}}{3}$$

$$= -4.5 \times 10^{-9} \text{ Vs}$$

$$Q_{pixel} = \frac{4.5 \times 10^{-9} \text{ Vs}}{26 \times 10^3 \Omega} \approx 0.2 \text{ pC}$$

**stesso risultato !**

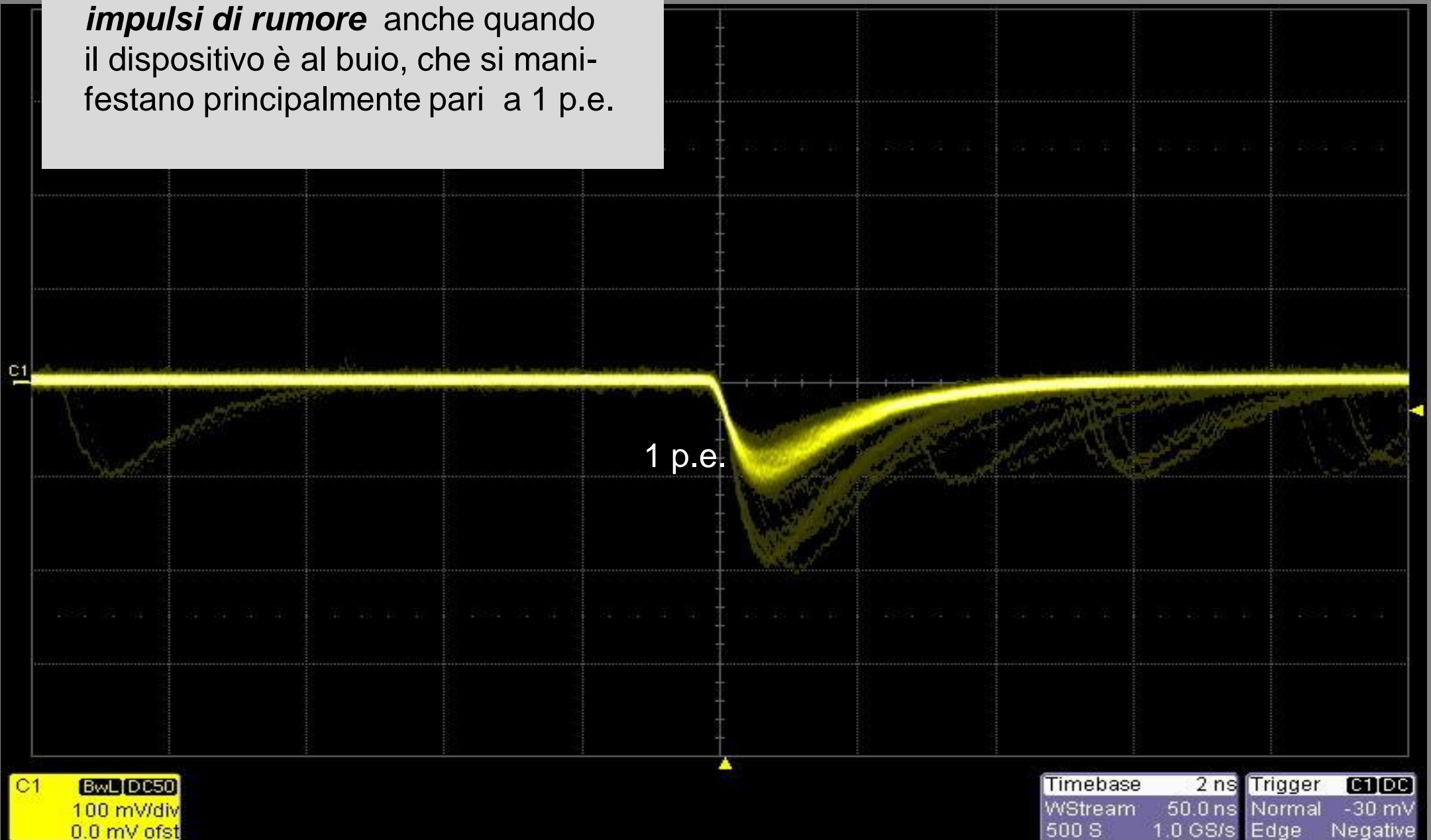
# Noise (1)

Trattandosi di un dispositivo a semiconduttore, all'interno della regione di svuotamento si hanno anche *coppie elettrone / lacuna generate per agitazione termica* .

Queste, se non si ricombinano, sotto l'azione del forte c. e. *possono dare anch'esse origine ad una valanga*, che non sarà ovviamente distinguibile da quella provocata dall'assorbimento di uno o più fotoni .

# Noise (2)

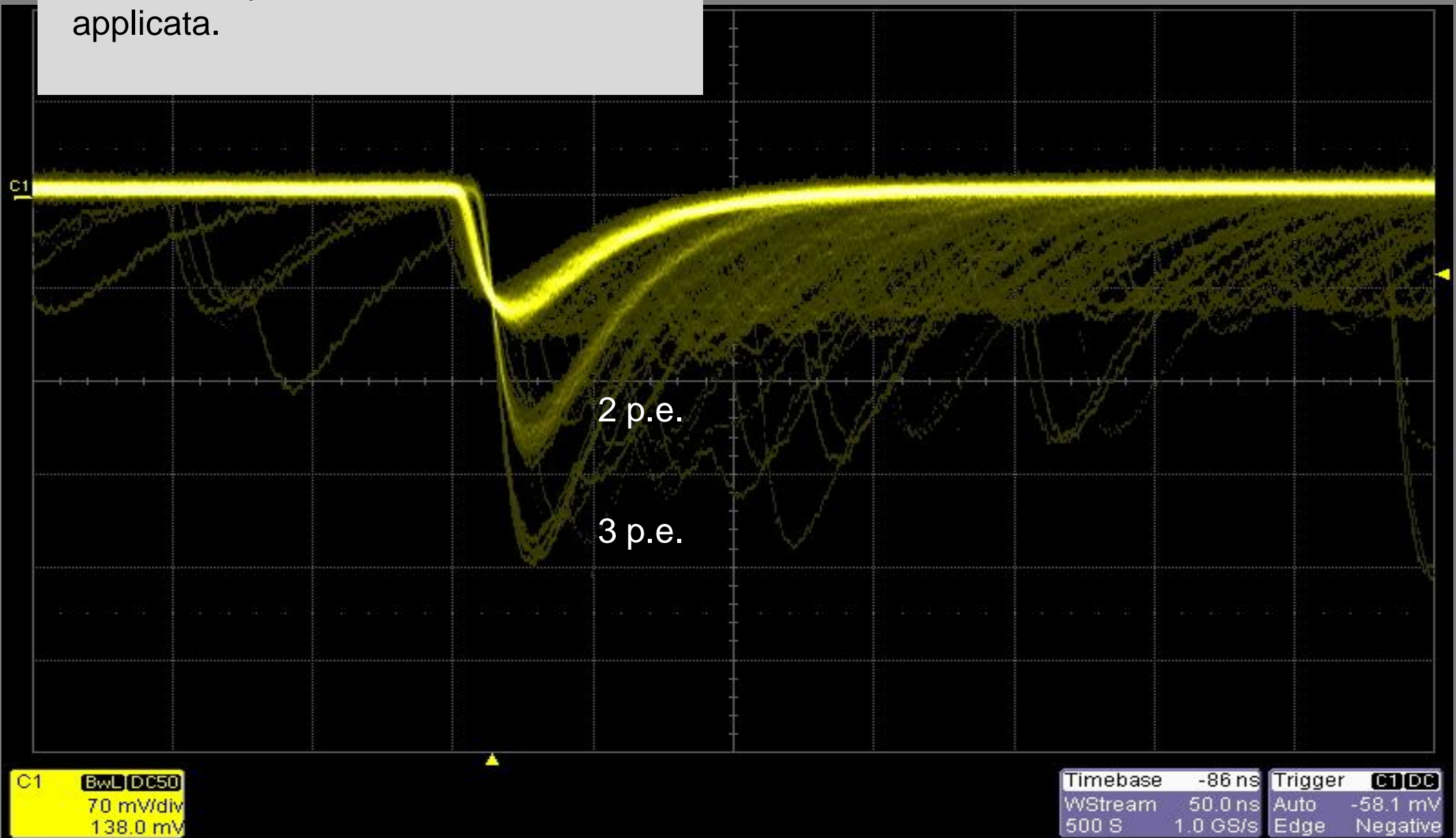
E' quindi giustificata la presenza di *impulsi di rumore* anche quando il dispositivo è al buio, che si manifestano principalmente pari a 1 p.e.





Tuttavia sono chiaramente presenti *anche eventi doppi, tripli e quadrupli*, ancora più evidenti aumentando la tensione di polarizzazione inversa applicata.

# Eventi multipli



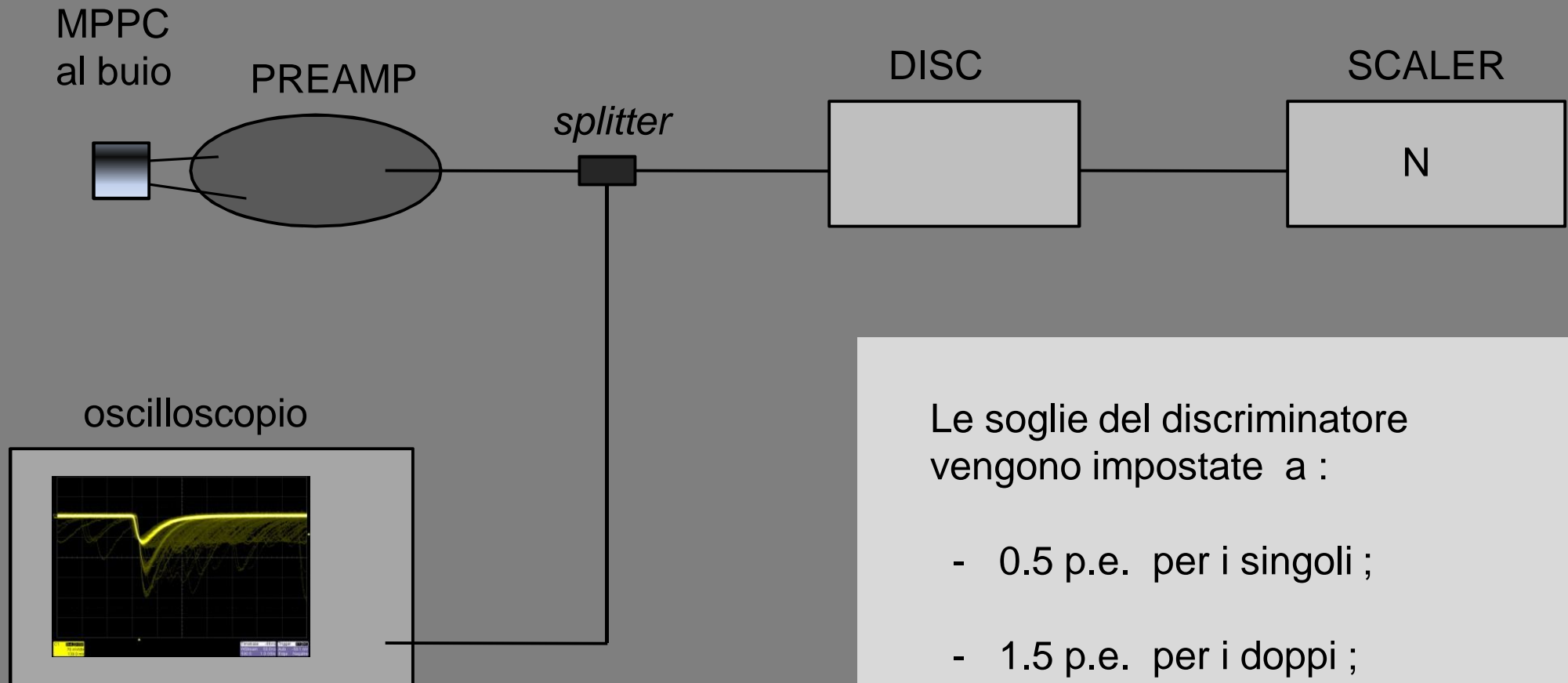
# *Optical crosstalk*

Ogni volta che si innesca una valanga è possibile l'emissione di *fotoni di bremsstrahlung* nell'infrarosso da parte di 'portatori caldi'; questi possono propagarsi nel silicio come in una guida d'onda *fino a raggiungere una cella vicina*, innescando così la moltiplicazione a valanga in un altro pixel .

Il secondo impulso di corrente però è spurio, perché non è correlato con la valanga iniziale.

Il fenomeno è chiamato *crosstalk ottico* (lett. 'diafonia ottica' ) ed è caratteristico di tutti i dispositivi formati da matrici integrate .

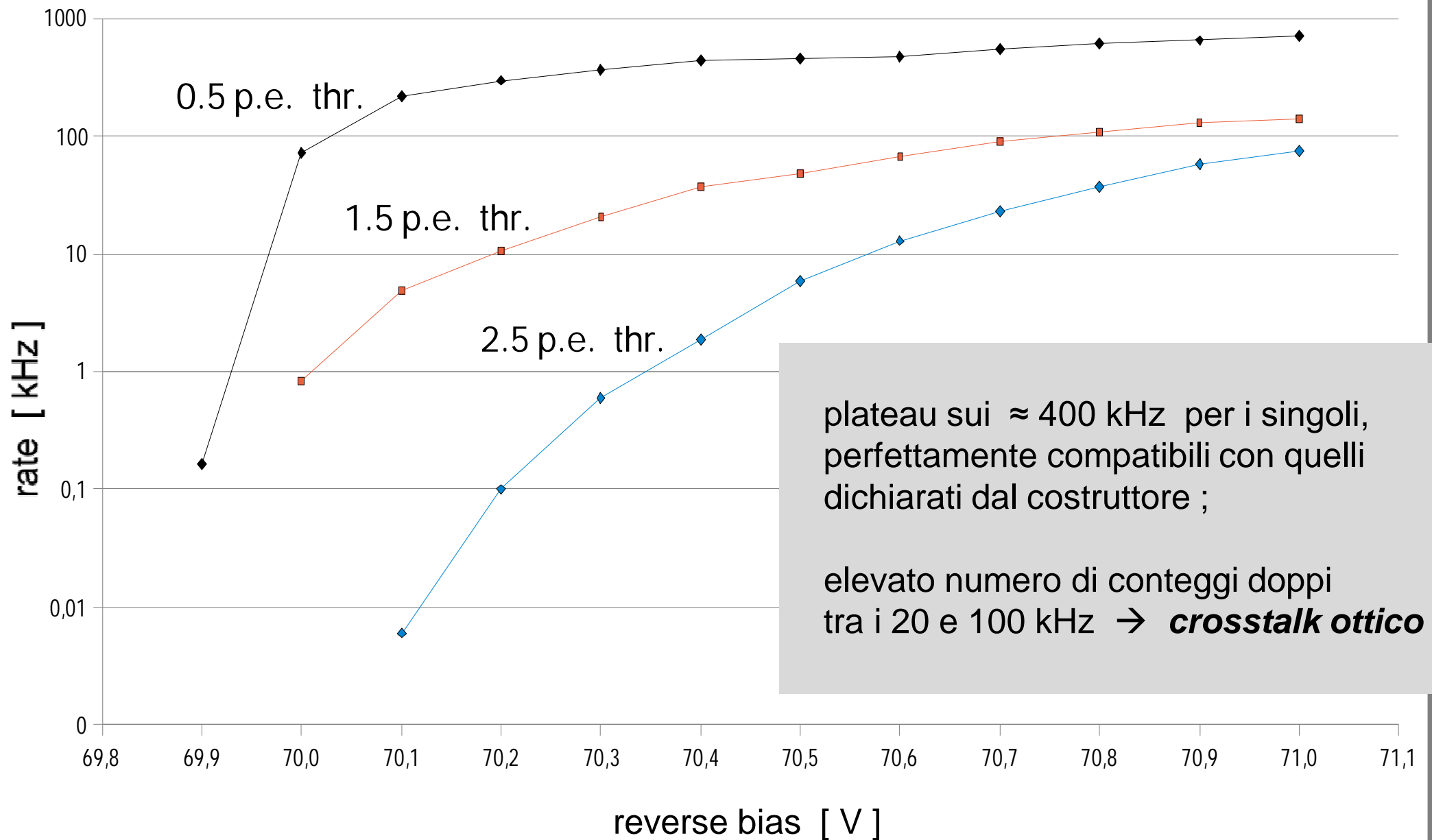
# Misura del *dark count rate*



Le soglie del discriminatore vengono impostate a :

- 0.5 p.e. per i singoli ;
- 1.5 p.e. per i doppi ;
- 2.5 p.e. per i tripli .

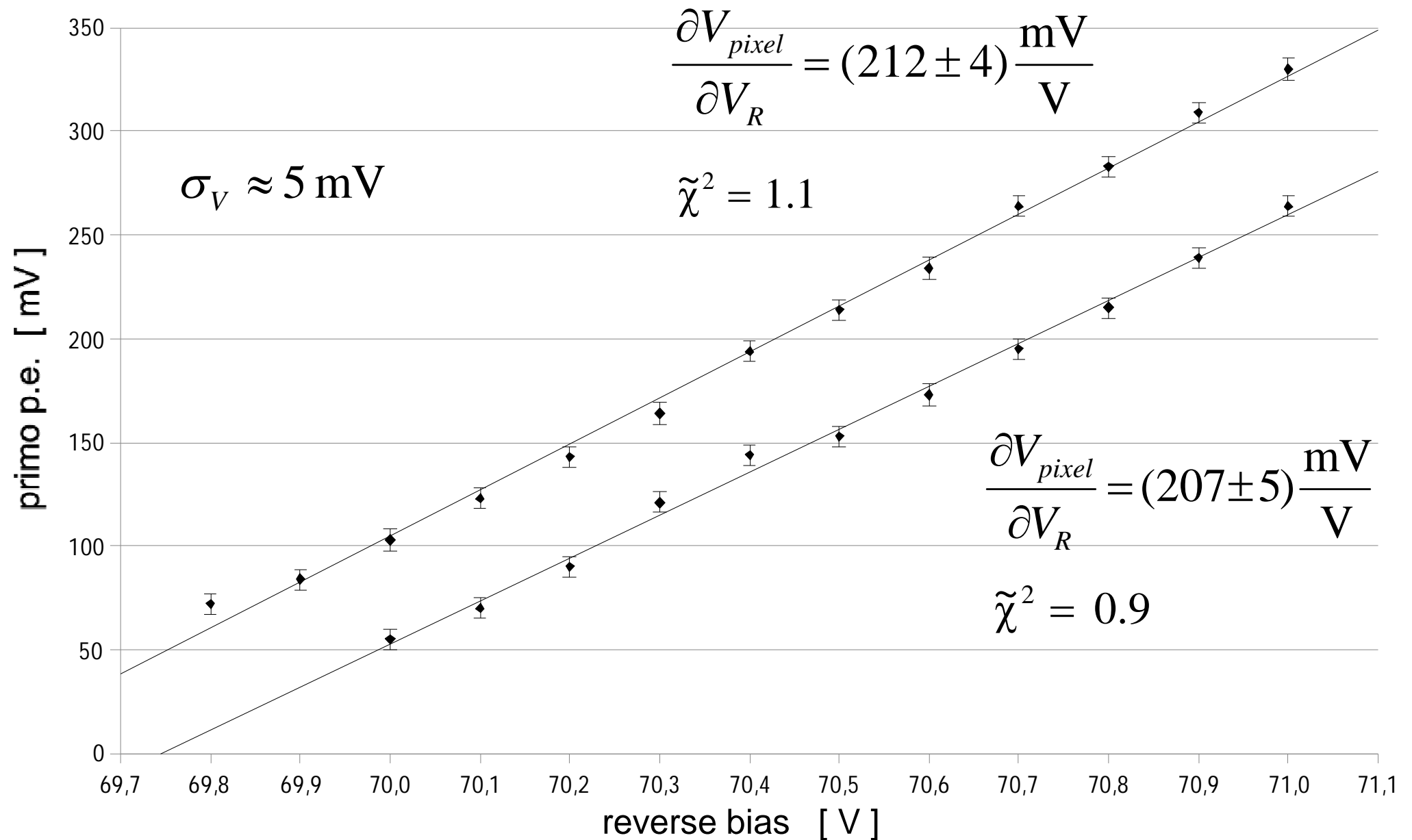
# Dark count vs. reverse bias



# Quindi . . .

- si tratta di *un rivelatore molto rumoroso se si imposta una soglia al di sotto del primo p.e.* , perciò è impensabile di eseguire misure di singolo fotone con un solo MPPC ;
- per poter utilizzare in modo efficace il dispositivo è necessario impostare *soglie superiori ad 1 p.e.* , oppure *applicare una tensione di polarizzazione inversa poco al di sopra del limite di funzionamento del sensore stesso* ( tra - 69.9 V e - 70.1 V ) ;
- lavorare in coincidenza utilizzando più dispositivi per misure di singolo fotone .

# Primo p.e. vs. reverse bias



# Guadagno vs. *reverse bias*

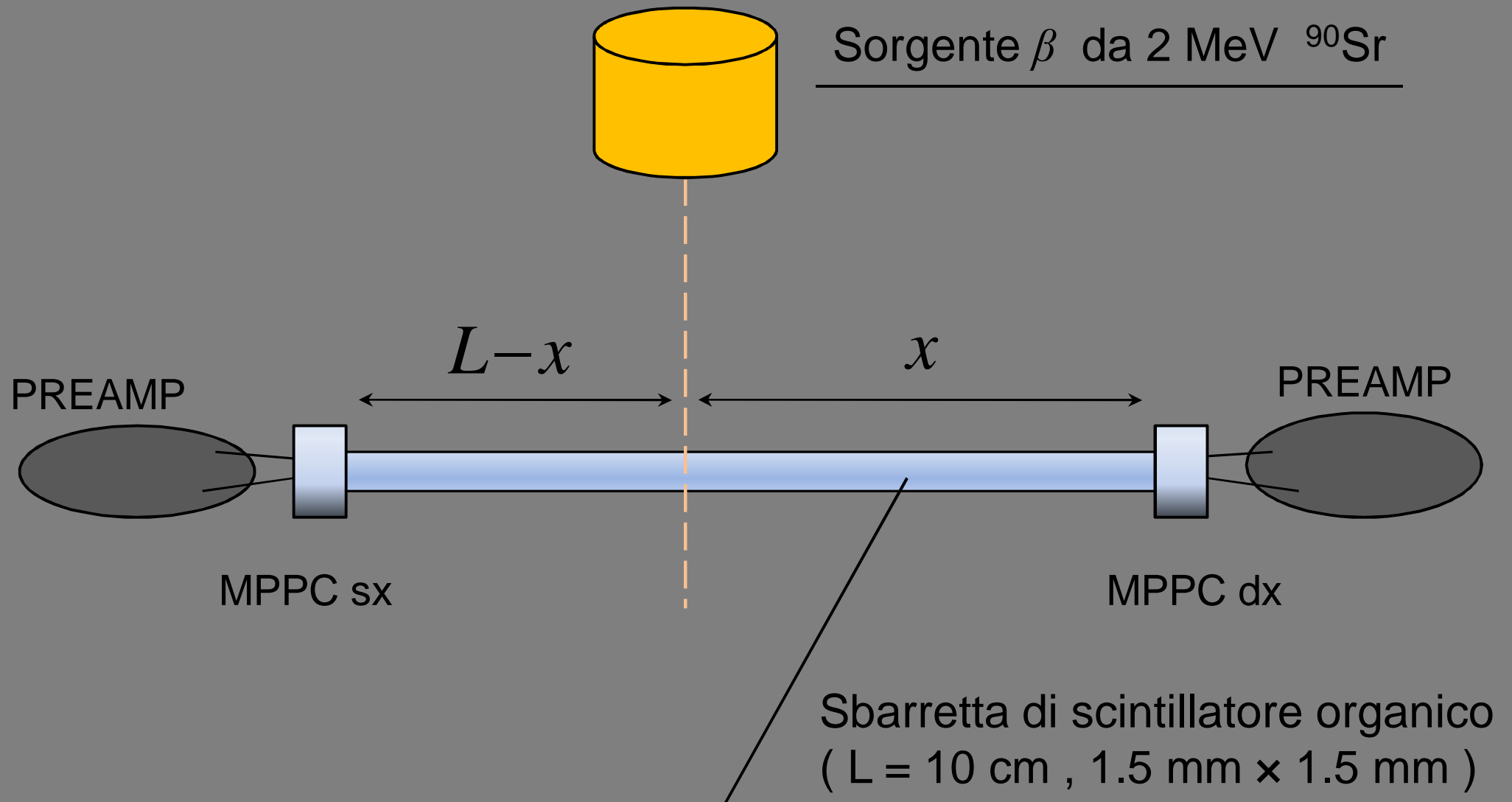
L' *ampiezza* dell'impulso relativo ad 1 p.e. ( quindi anche il guadagno in carica ) *cresce linearmente con la tensione di polarizzazione inversa applicata* , in particolare :

$$\frac{\partial V_{pixel}}{\partial V_R} \approx 200 \frac{\text{mV}}{\text{V}}$$

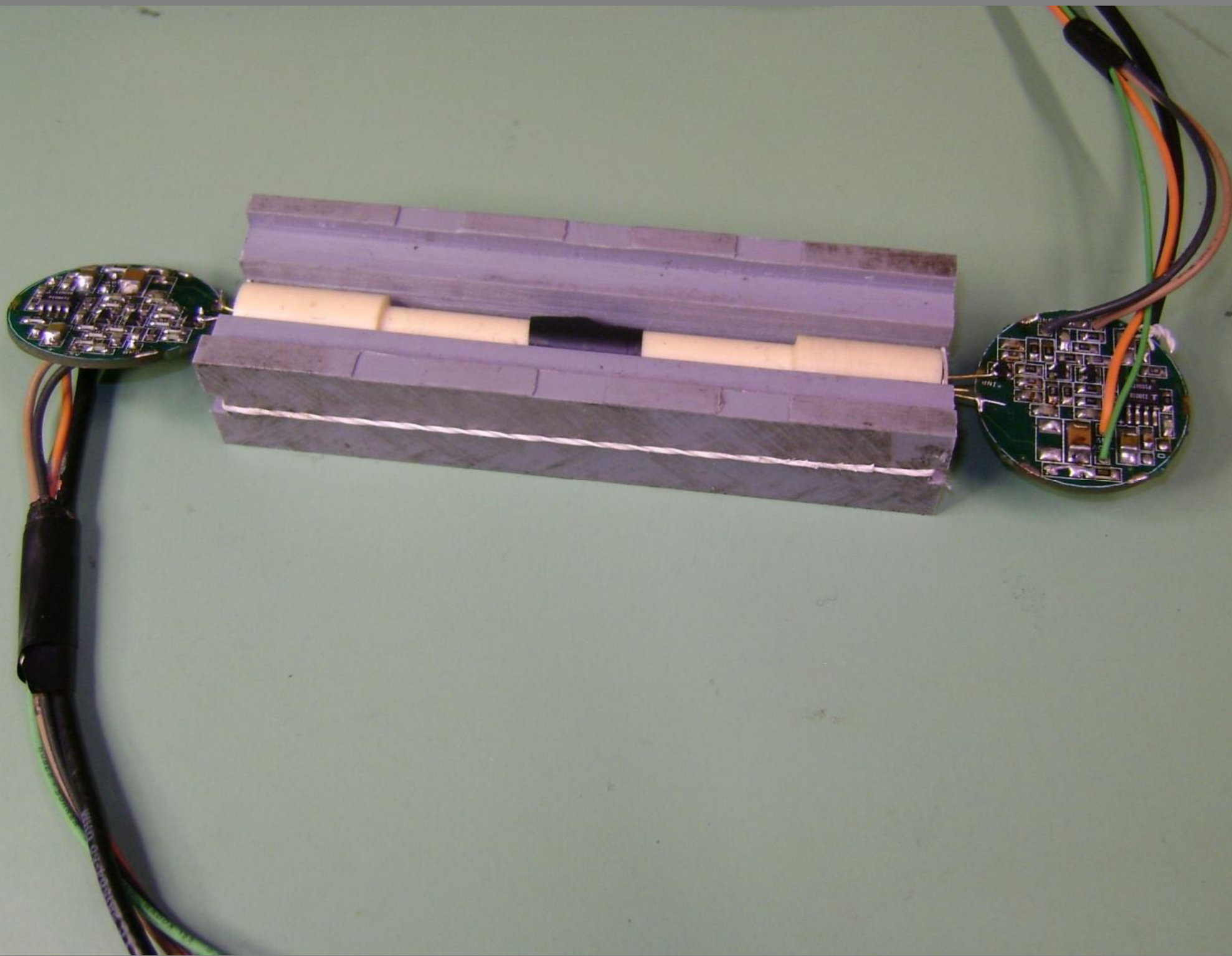
E' sorprendente che per ***una variazione di 0.1 V dell'alimentazione*** si misuri una variazione di ***≈ 20 mV sull'output del singolo pixel, circa il 10 - 25 % dell'ampiezza totale!***

Per far funzionare correttamente questi dispositivi sono necessari quindi *alimentatori stabilizzati di elevata qualità*, almeno in *una parte su 10<sup>4</sup>* .

# Applicazione : un *rivelatore di posizione*







# Attenuazione

L'attenuazione della luce lungo la sbarretta di scintillatore è di tipo esponenziale :

$$N(x) = N_o e^{-\alpha x}$$

- $N_o$  numero di fotoni di scintillazione emessi al passaggio degli elettroni ;
- $1/\alpha = 1 \text{ m}$  la *lunghezza di attenuazione* dichiarata per la sbarretta ;
- $N(x)$  e  $N(L-x)$  i fotoni che raggiungono i sensori alle due estremità .

# Calcolo della posizione

- Gli eventi rilevati tramite ADC sono ottenuti *in singola*, ovvero *acquisisce un MPPC alla volta, formando il gate di integrazione con l'altro* (  $\rightarrow$  *tempi di acquisizione molto lunghi, ~ 30 min. per  $10^5$  eventi!* ) .
- La carica totale è quindi proporzionale al numero totale di eventi ( = area sottesa allo spettro ) :

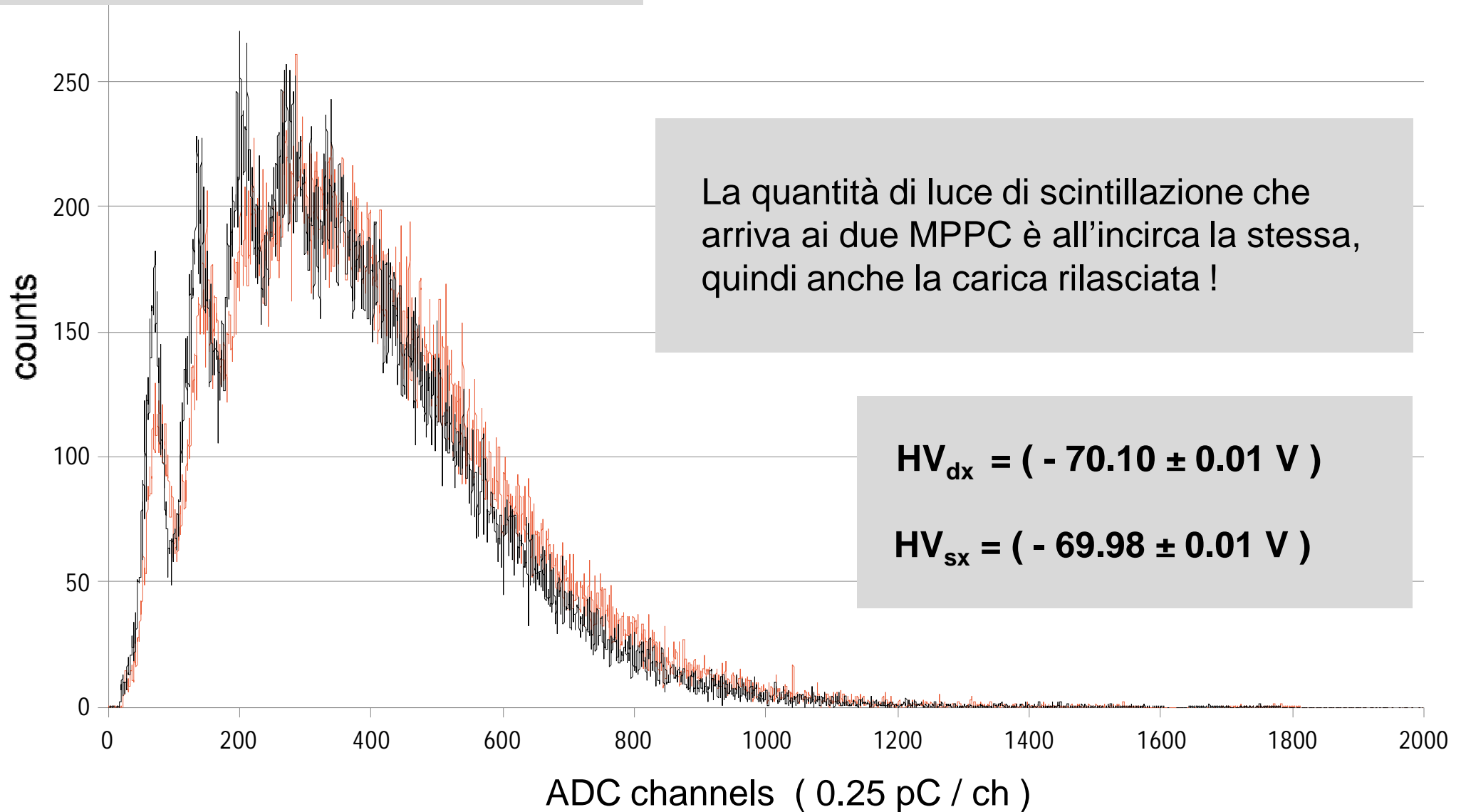
$$Q \propto N_{tot.} = \sum_{ADC\ ch.} N_{ch.}$$

$$\frac{Q_{destra}}{Q_{sinistro}} = \frac{N_{destra}}{N_{sinistro}} \rightarrow$$

$$x = \frac{L}{2} - \frac{\ln \left( \frac{N_{destra}}{N_{sinistro}} \right)}{2 \alpha}$$

# Sorgente al centro

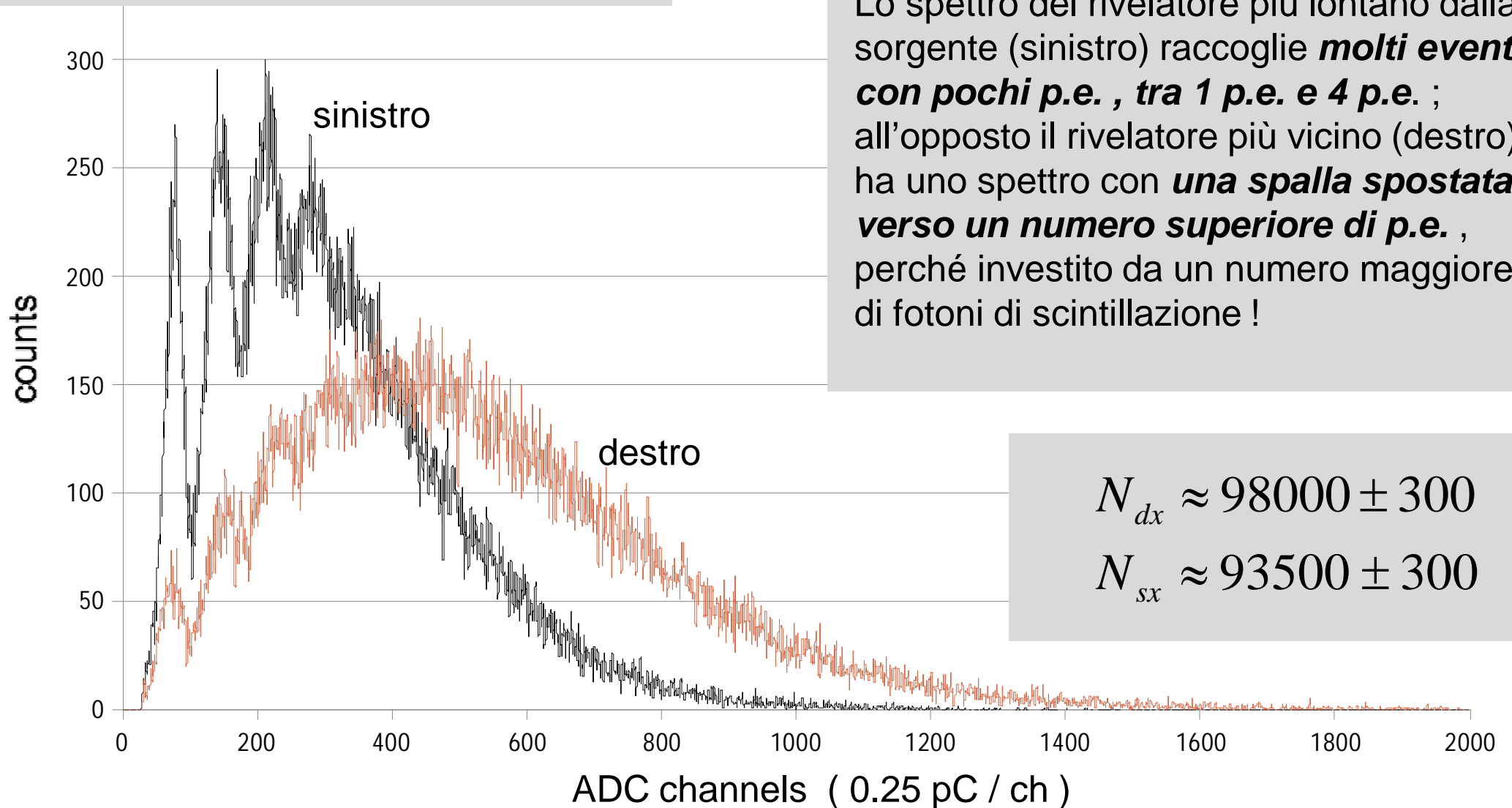
$$x_0 = (5.8 \pm 0.2) \text{ cm}$$



# Sorgente a destra

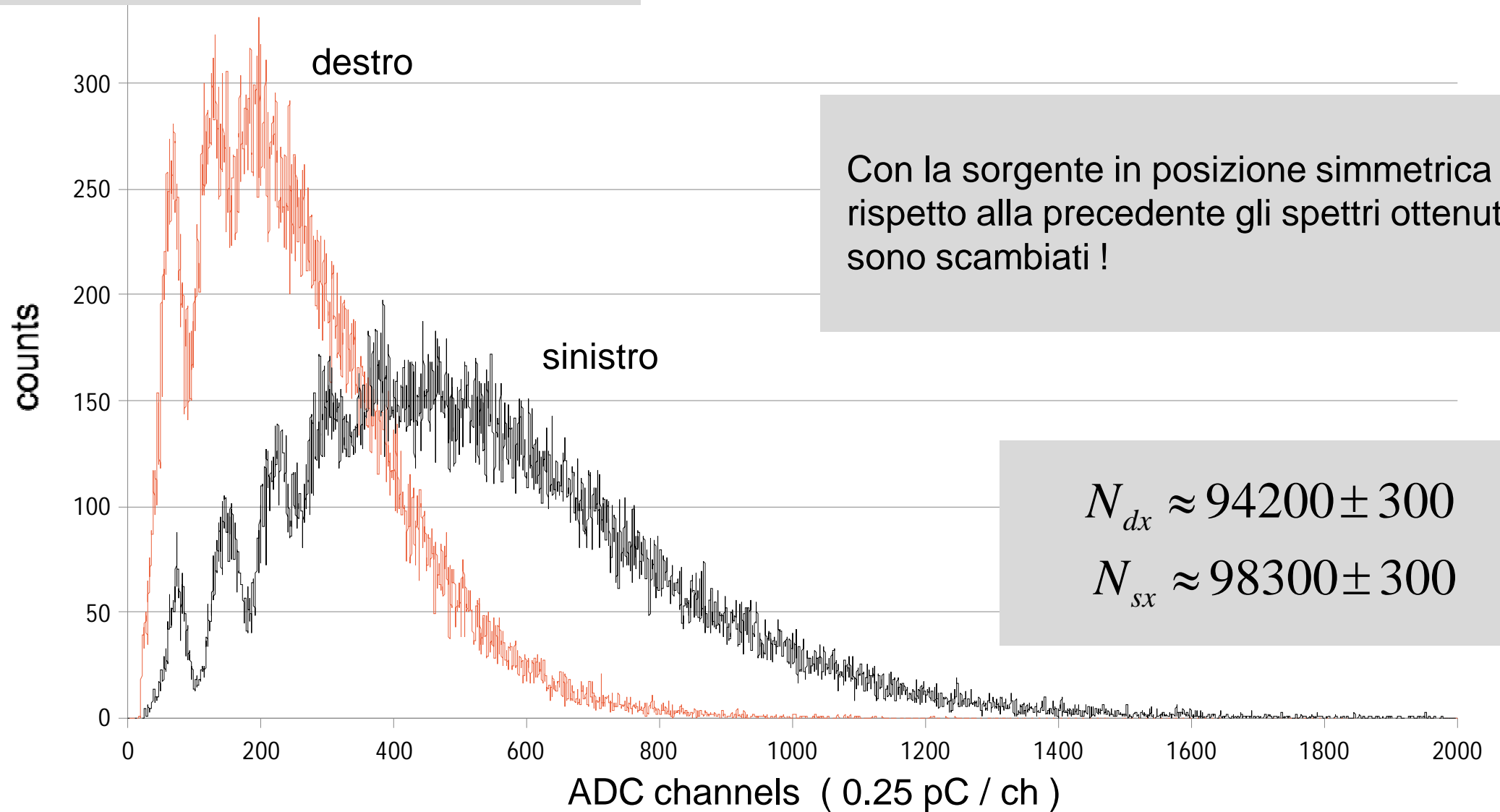
$$x_{dx} = (2.6 \pm 0.2) \text{ cm}$$

Lo spettro del rivelatore più lontano dalla sorgente (sinistro) raccoglie **molti eventi con pochi p.e.**, tra 1 p.e. e 4 p.e.; all'opposto il rivelatore più vicino (destro) ha uno spettro con **una spalla spostata verso un numero superiore di p.e.**, perché investito da un numero maggiore di fotoni di scintillazione!

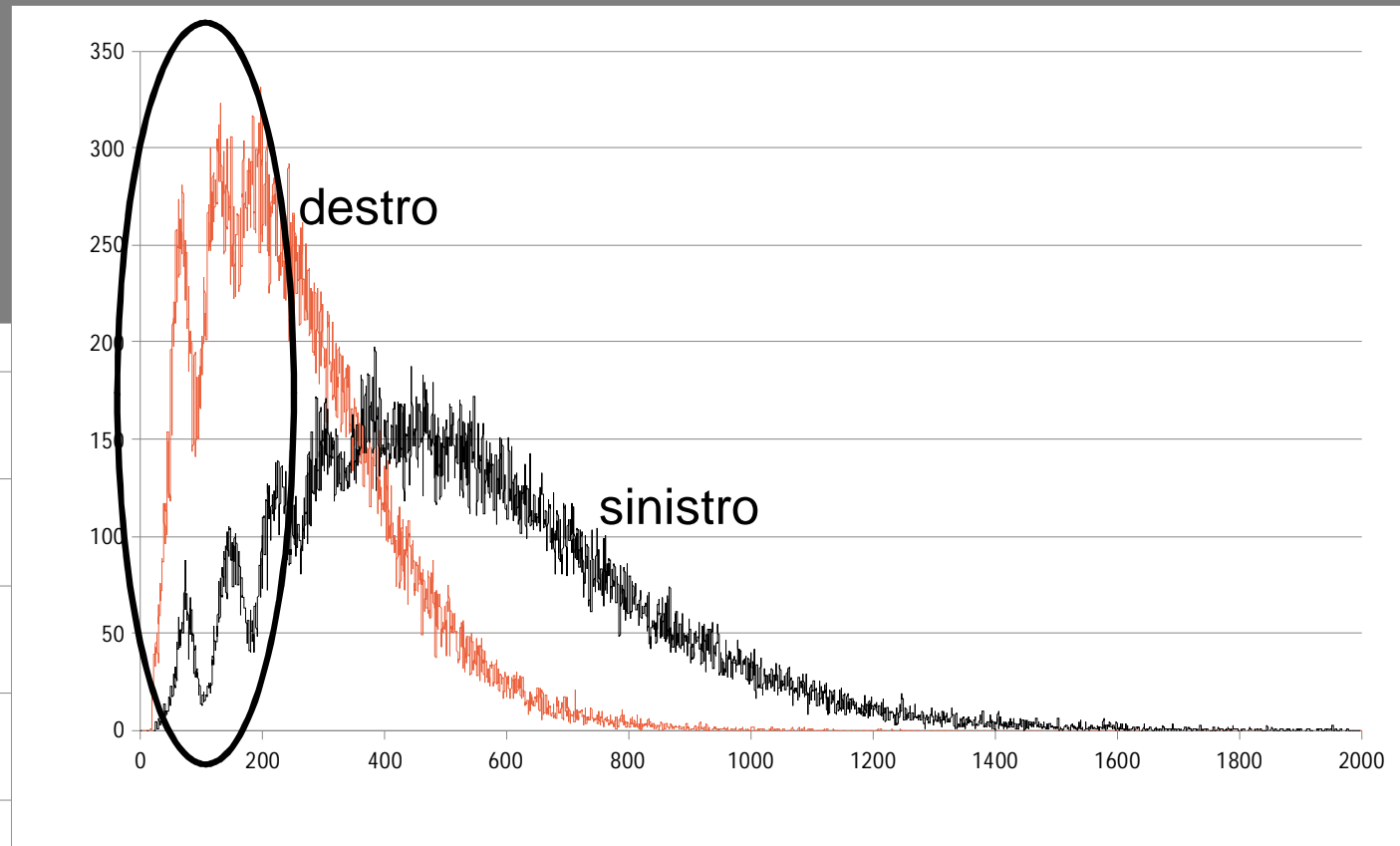
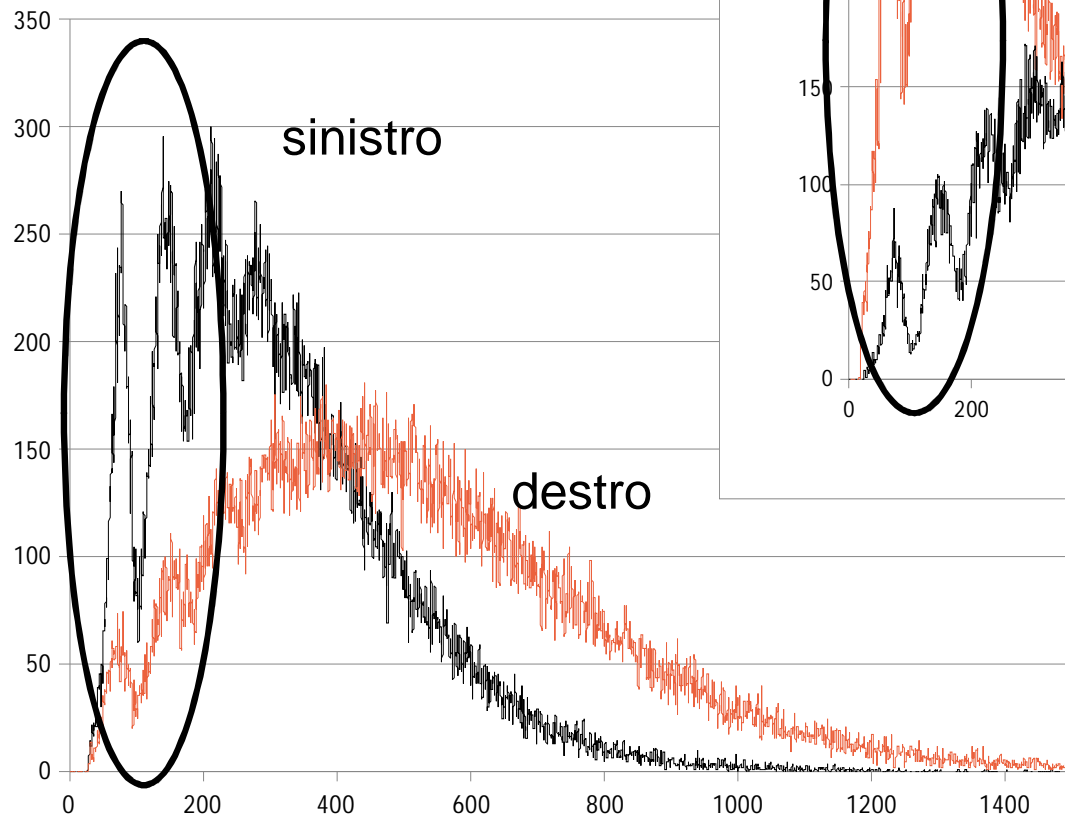


# Sorgente a sinistra

$$x_{sx} = (7.1 \pm 0.2) \text{ cm}$$



# Destro vs. sinistro



Si può osservare che i picchi ottenuti dal sinistro sono molto più netti, ***il destro invece è più rumoroso!***

# Conclusioni

- Tutte le misure di caratterizzazione hanno dato ***risultati perfettamente consistenti con le specifiche dichiarate*** ;
- dispositivi dotati di ***straordinarie potenzialità***, con tutti i vantaggi tipici dell'elettronica a stato solido ( es. possibilità di lavorare in c. m. , dimensioni fisiche ridotte, elevata efficienza quantica etc. ) ;
- sono però ***estremamente sensibili*** ( es. temperatura, anche se questa dipendenza non è stata studiata esplicitamente) ***e intrinsecamente molto rumorosi*** !
- *work in progress* .....



***Grazie a tutti  
per l'attenzione !***