

**Tesi magistrale:**  
**Analisi in tempo reale dei segnali dei rivelatori**  
**SiPM per l'esperimento DarkSide20k**



Giacomo Petrillo  
2021-06-21



# Introduzione

# Materia oscura

La materia oscura è un alone di una sostanza invisibile in cui sono immerse le galassie (in particolare la nostra).

L'85 % della galassia è materia oscura, quindi si sente bene l'attrazione gravitazionale e siamo sicuri che ci sia anche se non si vede. Inoltre si vede l'effetto sulla radiazione cosmica di fondo.

Però nessuno è riuscito a rivelarla direttamente.



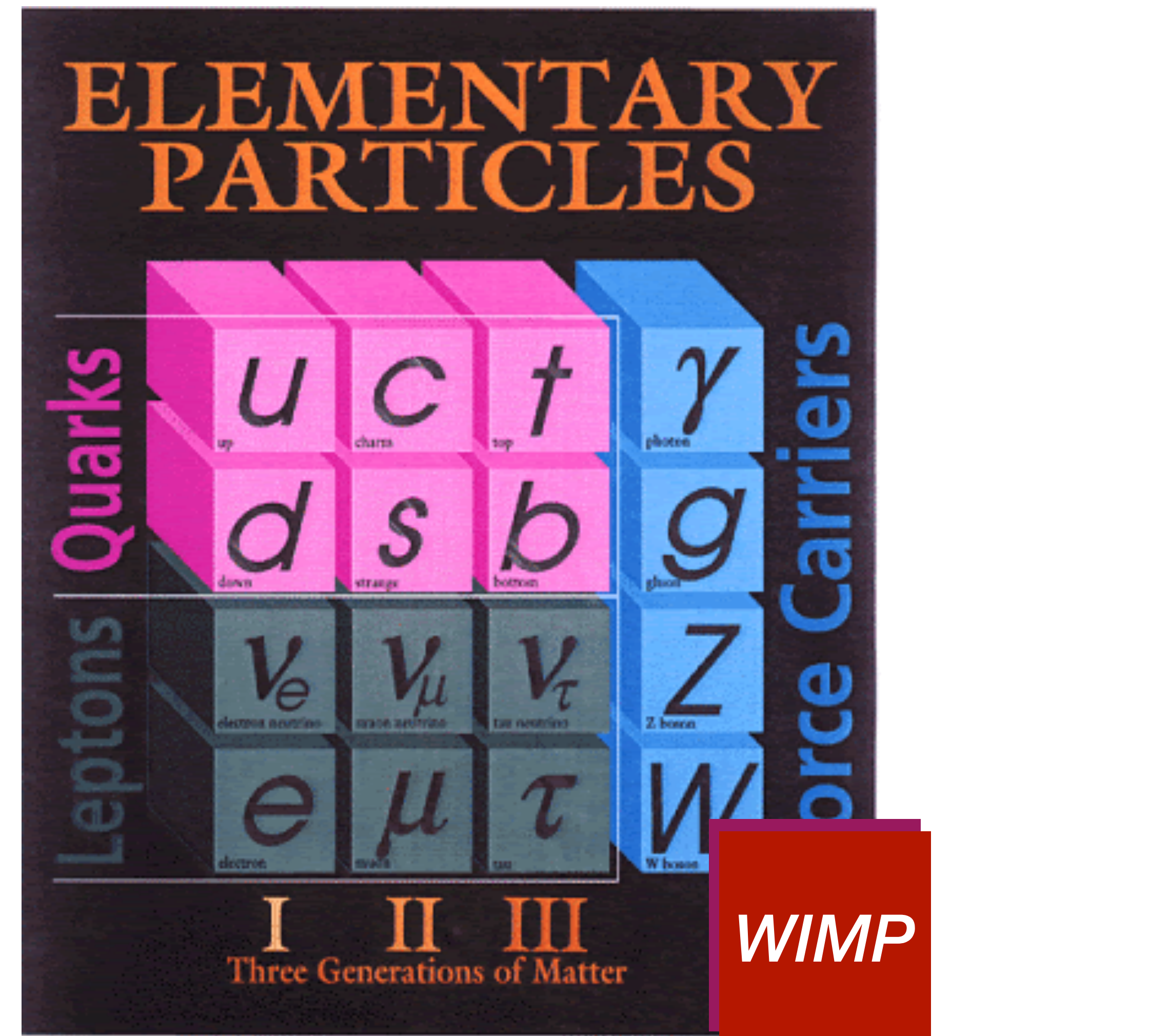


# WIMP

Una delle ipotesi è che la materia oscura sia costituita da particelle non classificate chiamate *WIMP* = Weakly Interactive Massive Particle.

"Weakly Interactive" perché deve avere sezioni d'urto molto piccole, molto approssimativamente le stesse sezioni d'urto della forza debole.

"Massive" perché deve essere non relativistica per stare agglomerata (quindi non sono neutrini), e quindi avere massa significativa. La massa attesa è circa tra 1 GeV e 100 TeV.



Una specie di neutrino senza interazione elettromagnetica

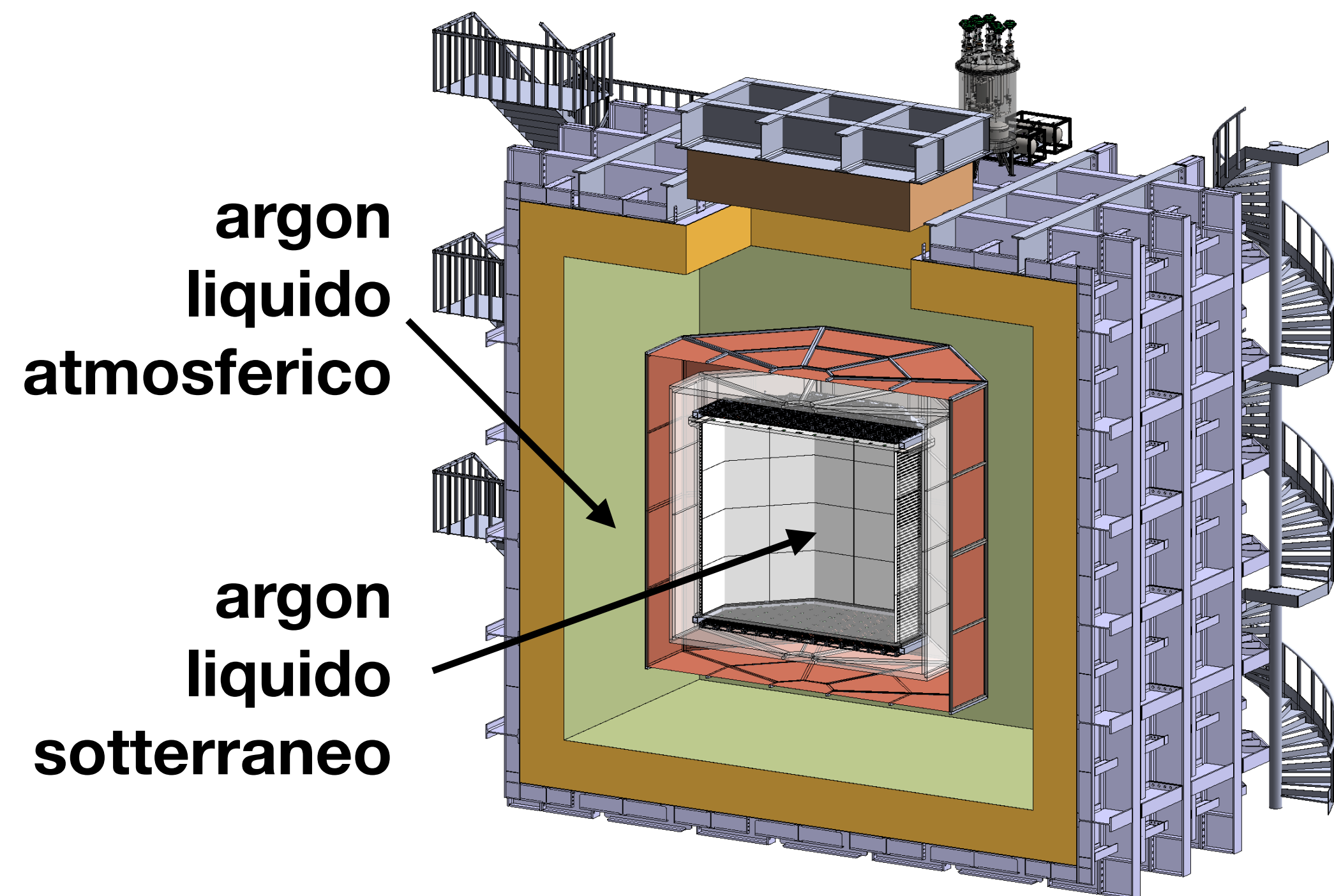


# L'esperimento DarkSide20k

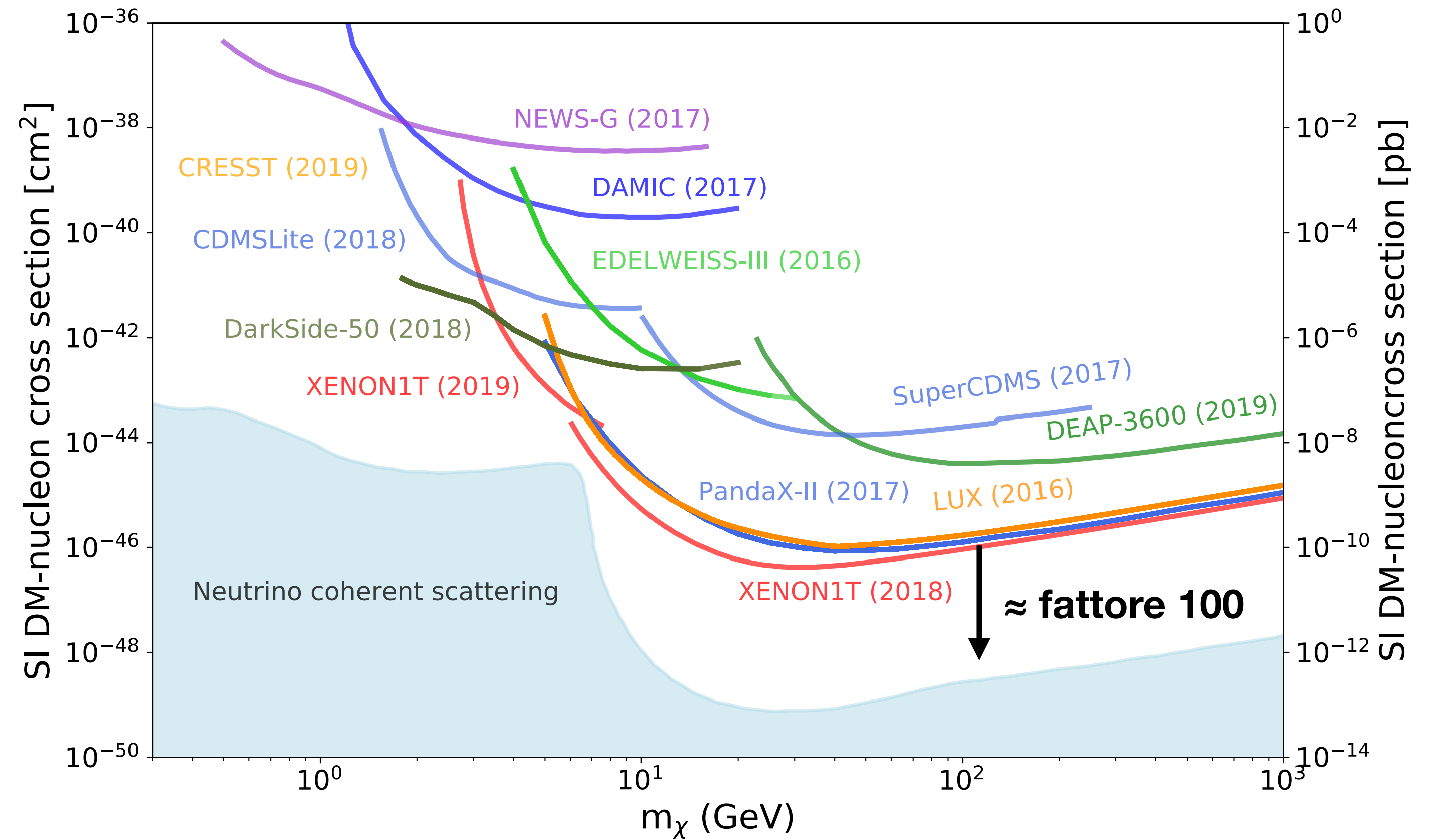
Rivelazione diretta delle WIMP.

Sarà ospitato ai laboratori nazionali del Gran Sasso.

Il bersaglio è 20 ton di argon liquido, con 21 m<sup>2</sup> di fotorivelatori.



Limiti superiori alla sezione d'urto delle WIMP



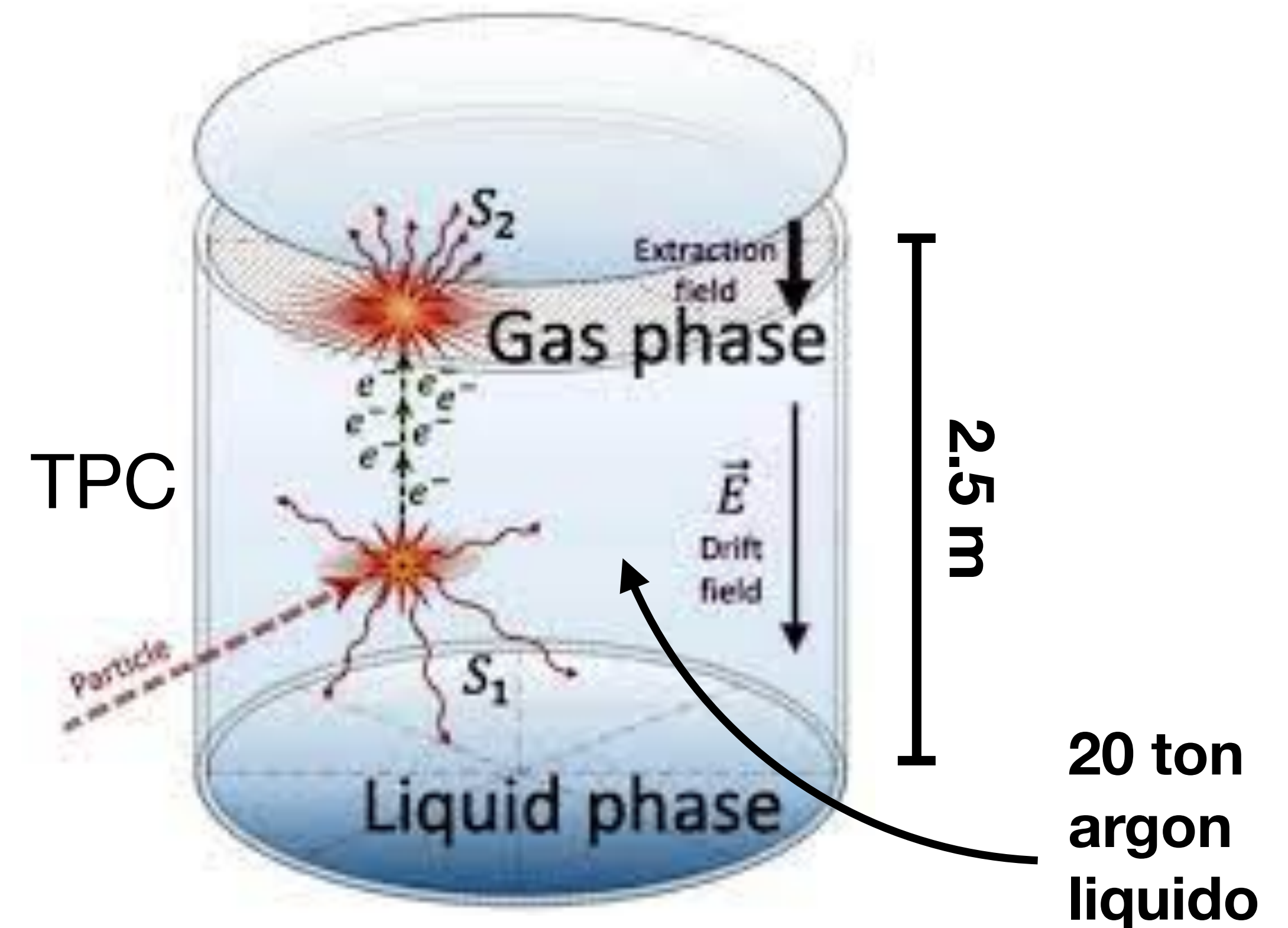
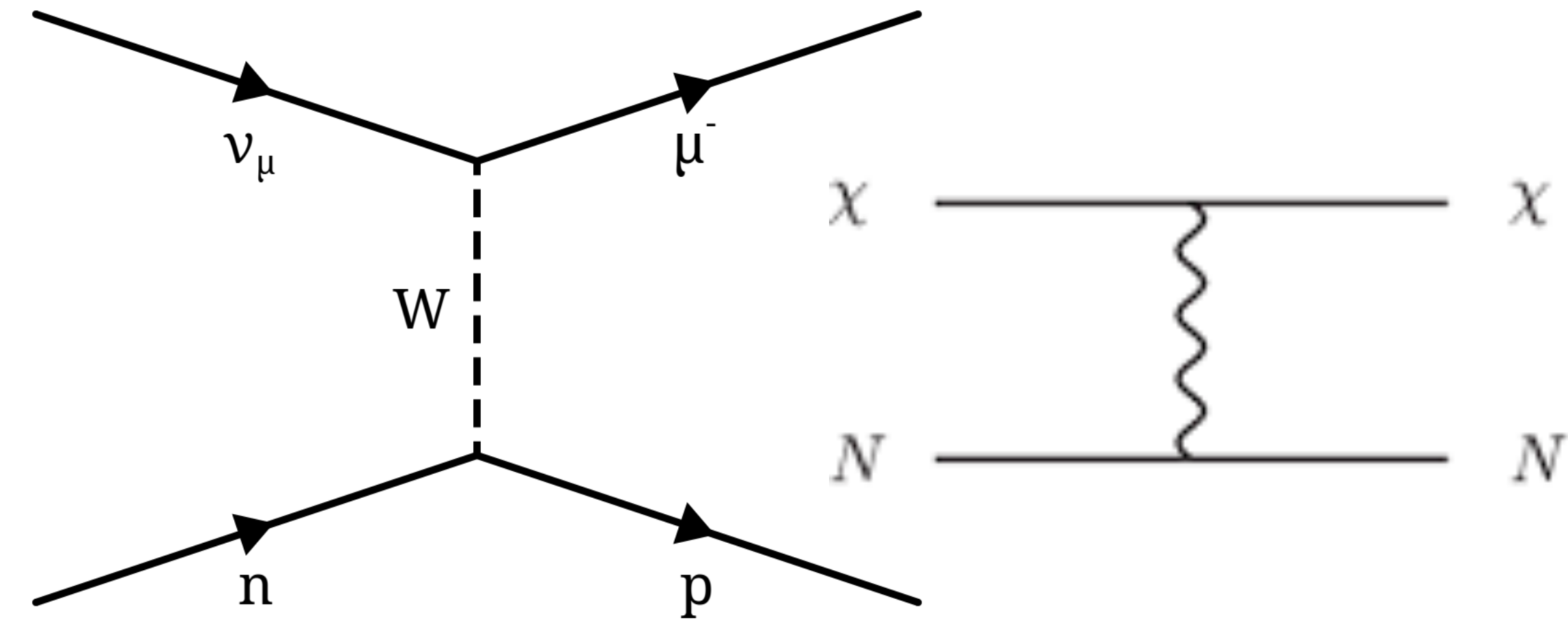
# Rivelazione delle WIMP

Vagamente simile alla rivelazione dei neutrini: si usa un grosso bersaglio liquido ben schermato e si escludono le radiazioni di fondo.

Differenza principale: i neutrini interagiscono producendo particelle cariche in uscita, mentre i WIMP fanno urti elastici con i nuclei.

Quindi bisogna rivelare il rinculo di un singolo nucleo all'interno del bersaglio. Il rinculo produce fotoni e ioni+elettroni.

Nella camera a proiezione temporale a doppia fase, gli elettroni vengono accelerati per produrre a loro volta fotoni.





# Fondi

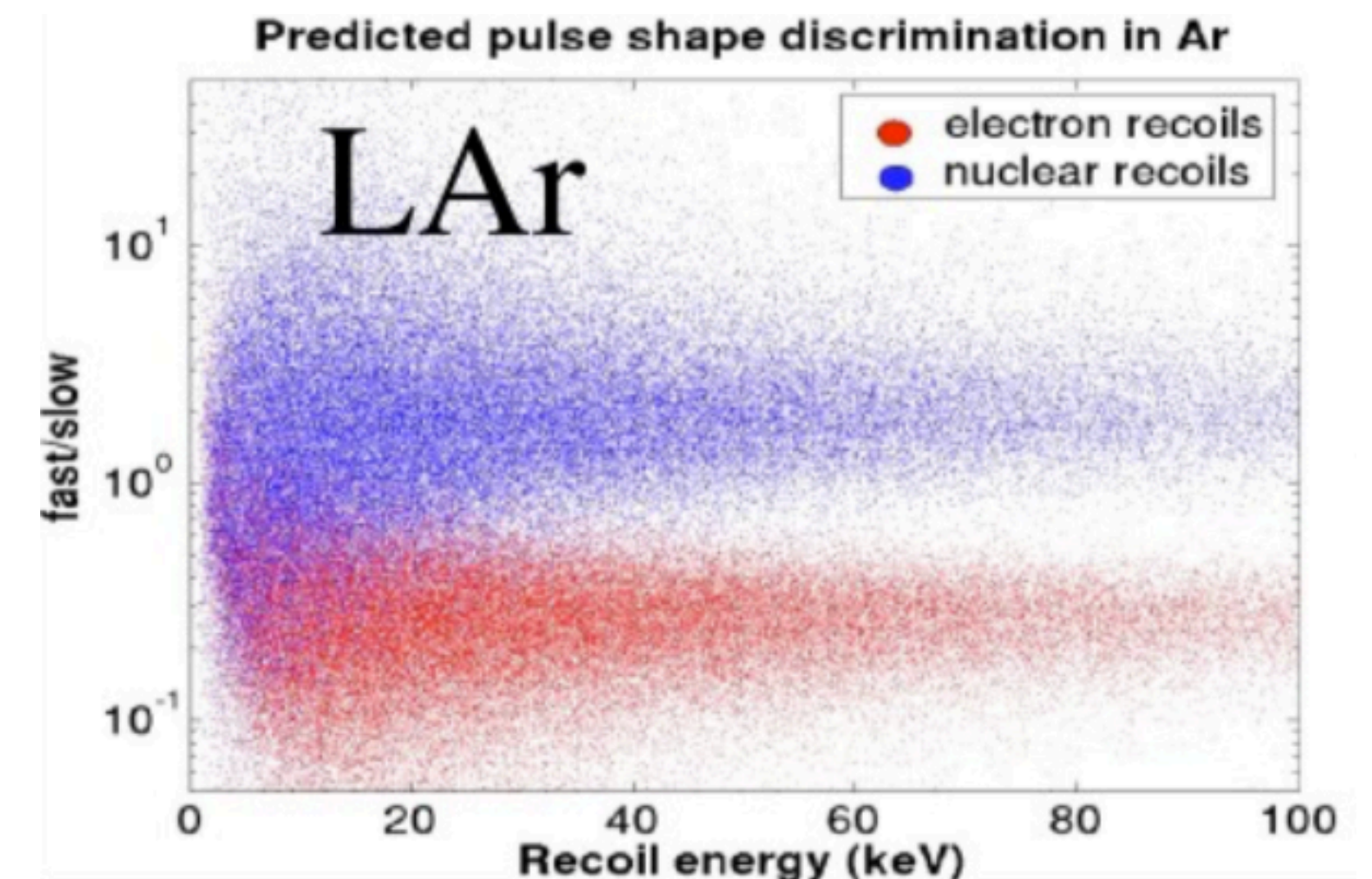
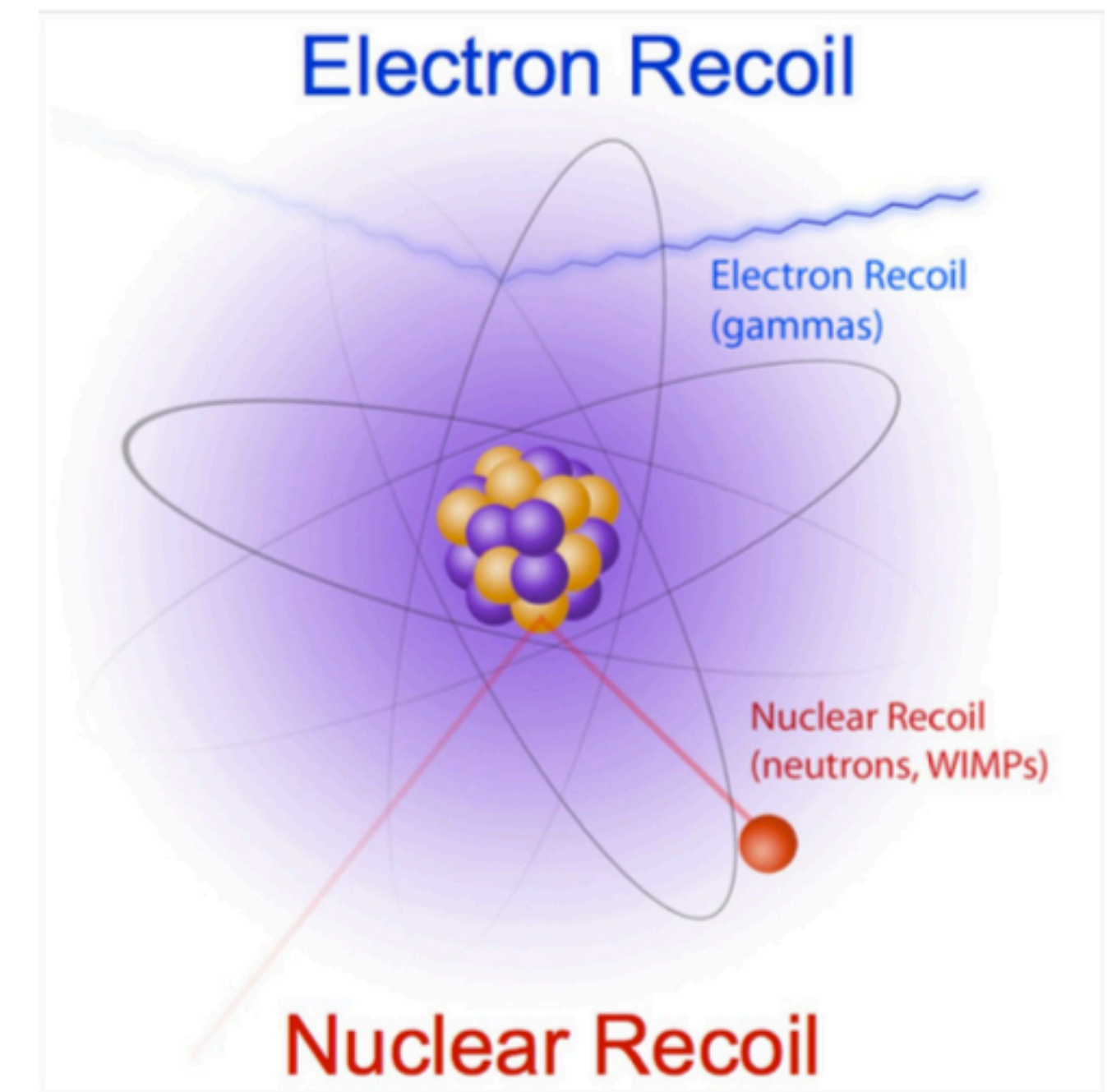
Ci sono due tipi di fondi. DarkSide20k è un esperimento a zero fondo nel senso che deve escluderli tutti anziché trattarli statisticamente.

Fondi che colpiscono gli elettroni (electron recoil, ER): gamma.

Fondi che colpiscono i nuclei (nuclear recoil, NR): neutroni.

Per escludere i gamma bisogna distinguere ER da NR. Si usa il fatto che NR emette più stati eccitati che decadono in fretta ( $\approx 10$  ns) rispetto a quelli lenti ( $\approx 1$   $\mu$ s).

Questa tecnica, che funziona per l'argon, si chiama pulse shape discrimination (PSD).



# Fotorivelatori

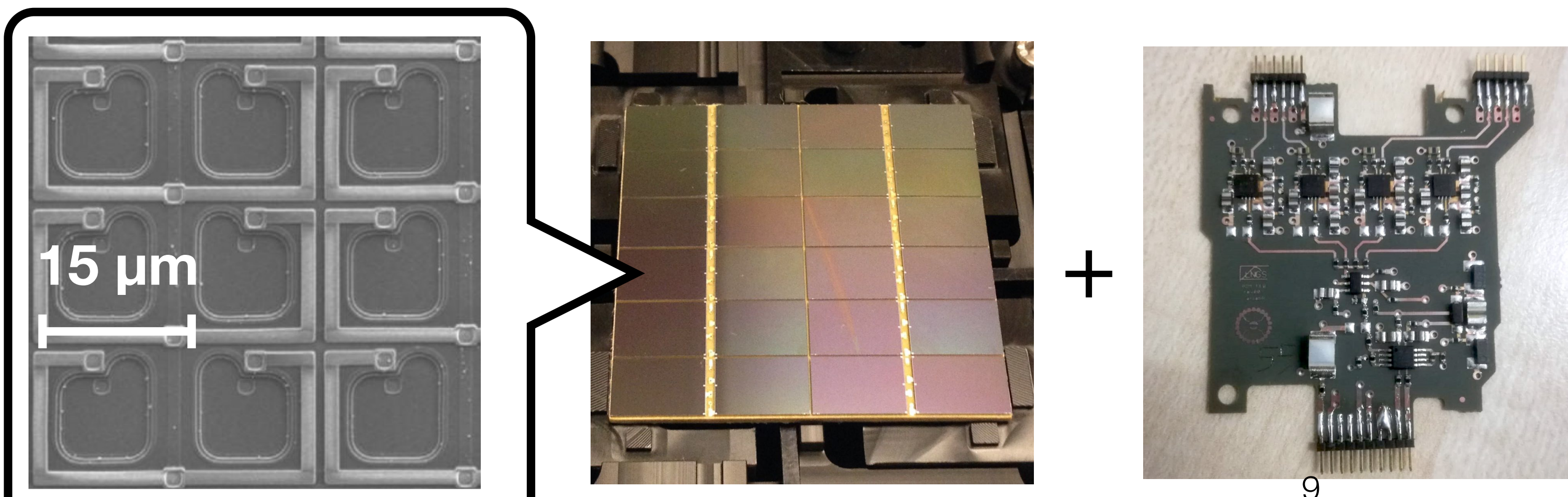
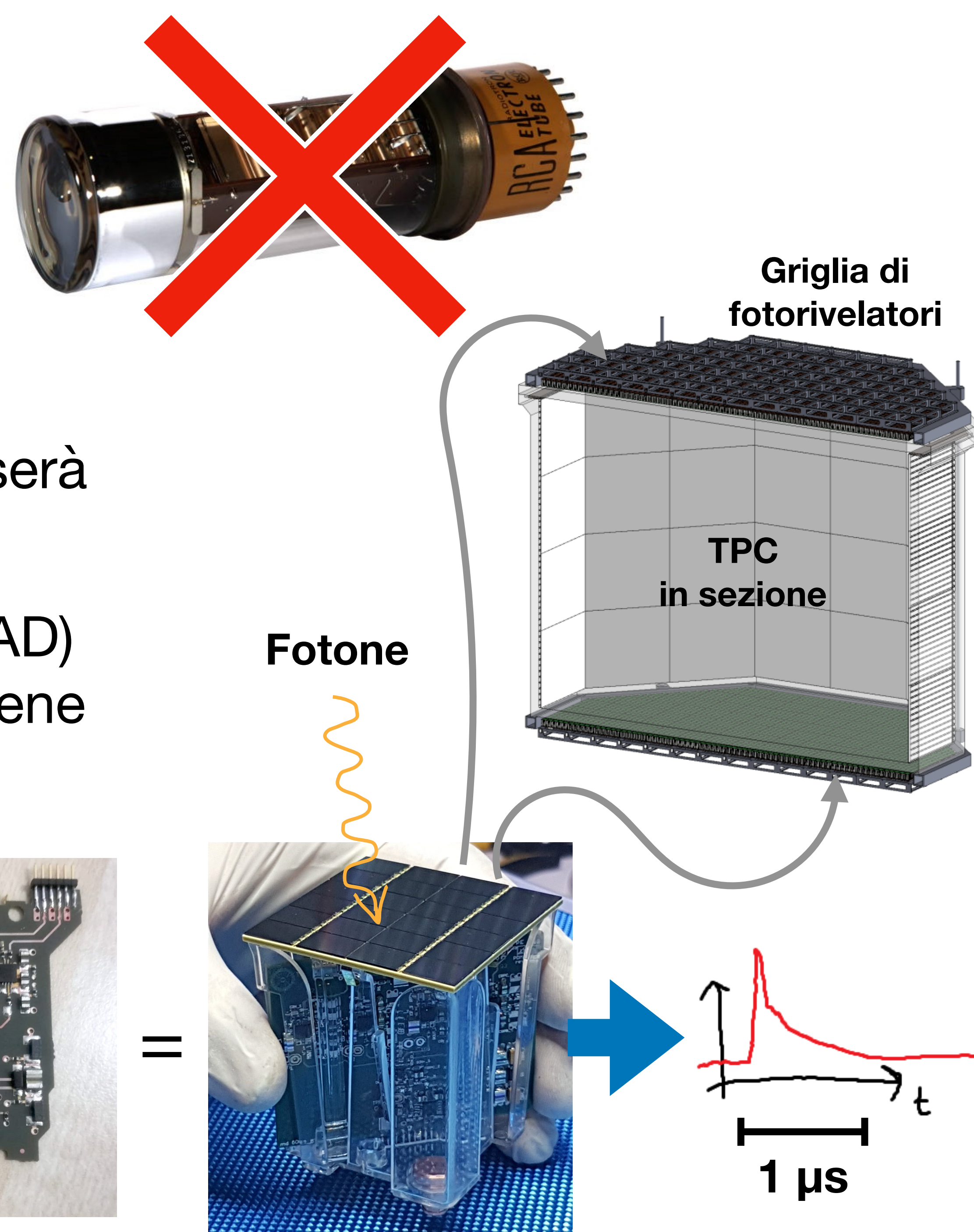


# Fotorivelatori

Mi sono occupato di studiare alcuni aspetti dei fotorivelatori di DarkSide20k.

Al posto dei tubi fotomoltiplicatori (PMT) usati nell'esperimento di generazione precedente, userà dei fotomoltiplicatori al silicio (SiPM).

I SiPM sono delle matrici di microfotodiodi (SPAD) sommati analogicamente. Quando un fotone viene rivelato, l'output è un impulso lungo circa 1 us.





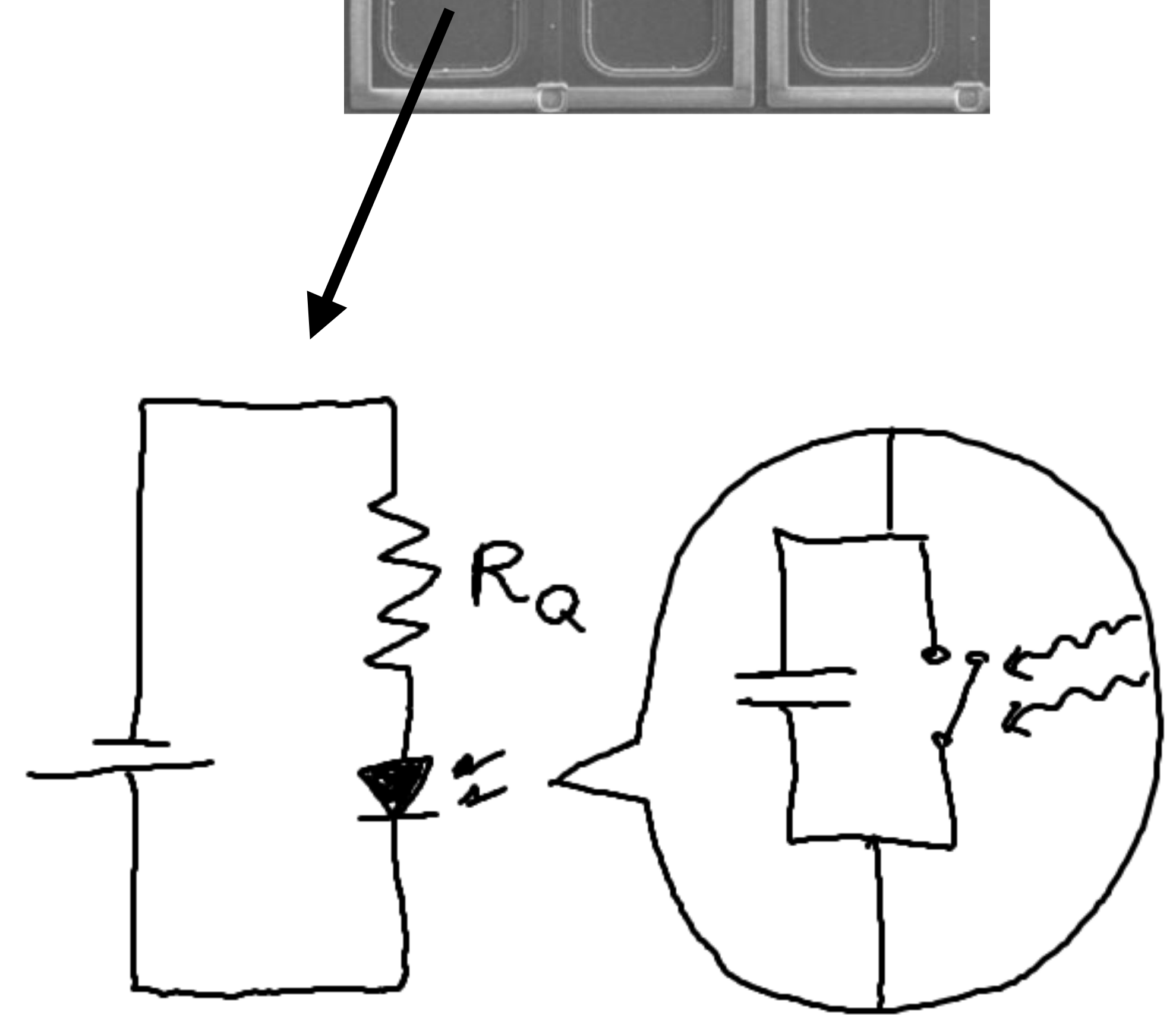
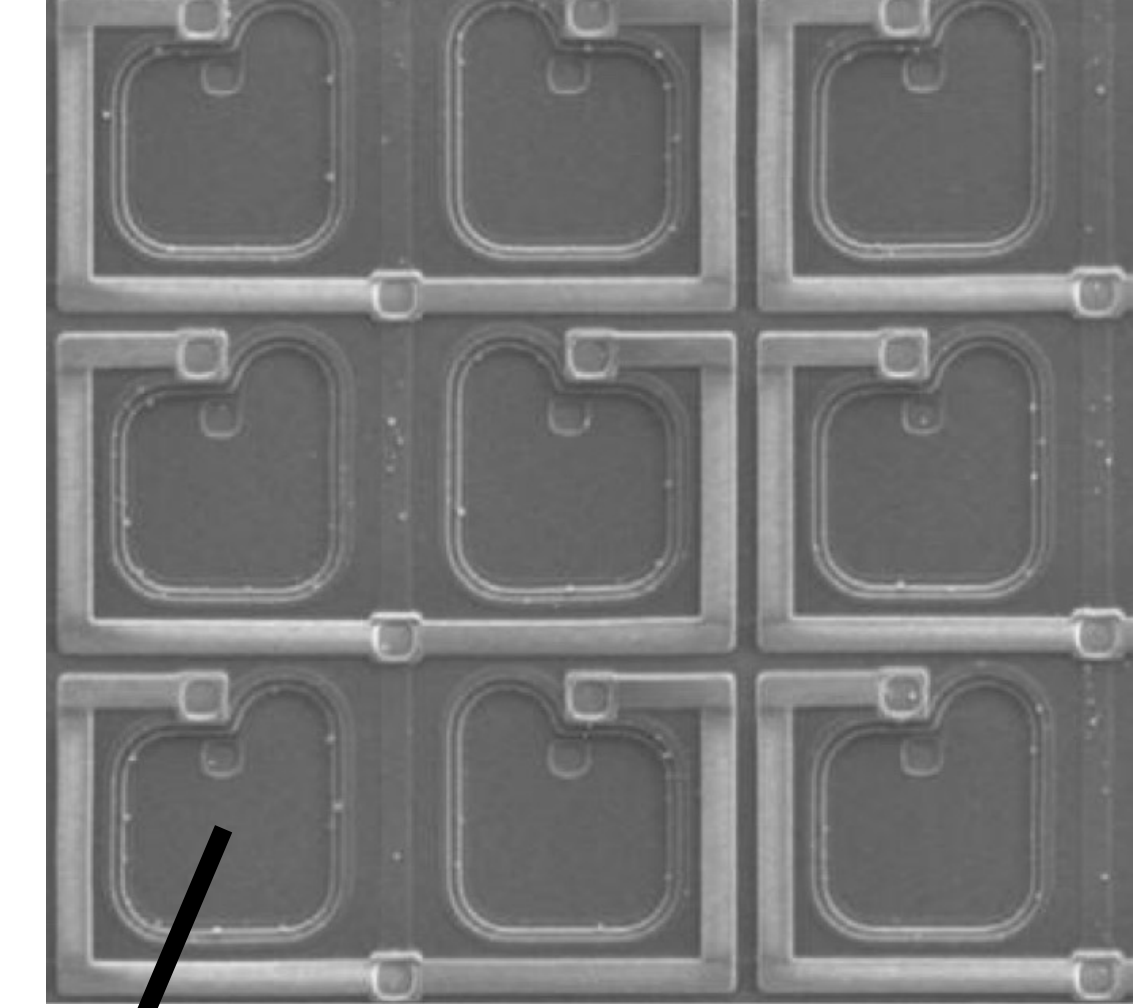
# SiPM

Ogni fotodiode del SiPM è polarizzato inversamente, oltre la tensione di rottura.

La differenza tra la tensione applicata e quella di rottura si chiama overvoltage.

È uno stato metastabile. Quando un portatore di carica si libera (fotone o energia termica o effetto tunnel) parte la corrente a valanga, che normalmente aumenterebbe fino a distruggere il diodo.

La corrente viene interrotta da un resistore in serie. Quando scorre corrente, la caduta di tensione sul resistore fa scendere il diodo sotto la tensione di rottura.





# Rumore dei SiPM

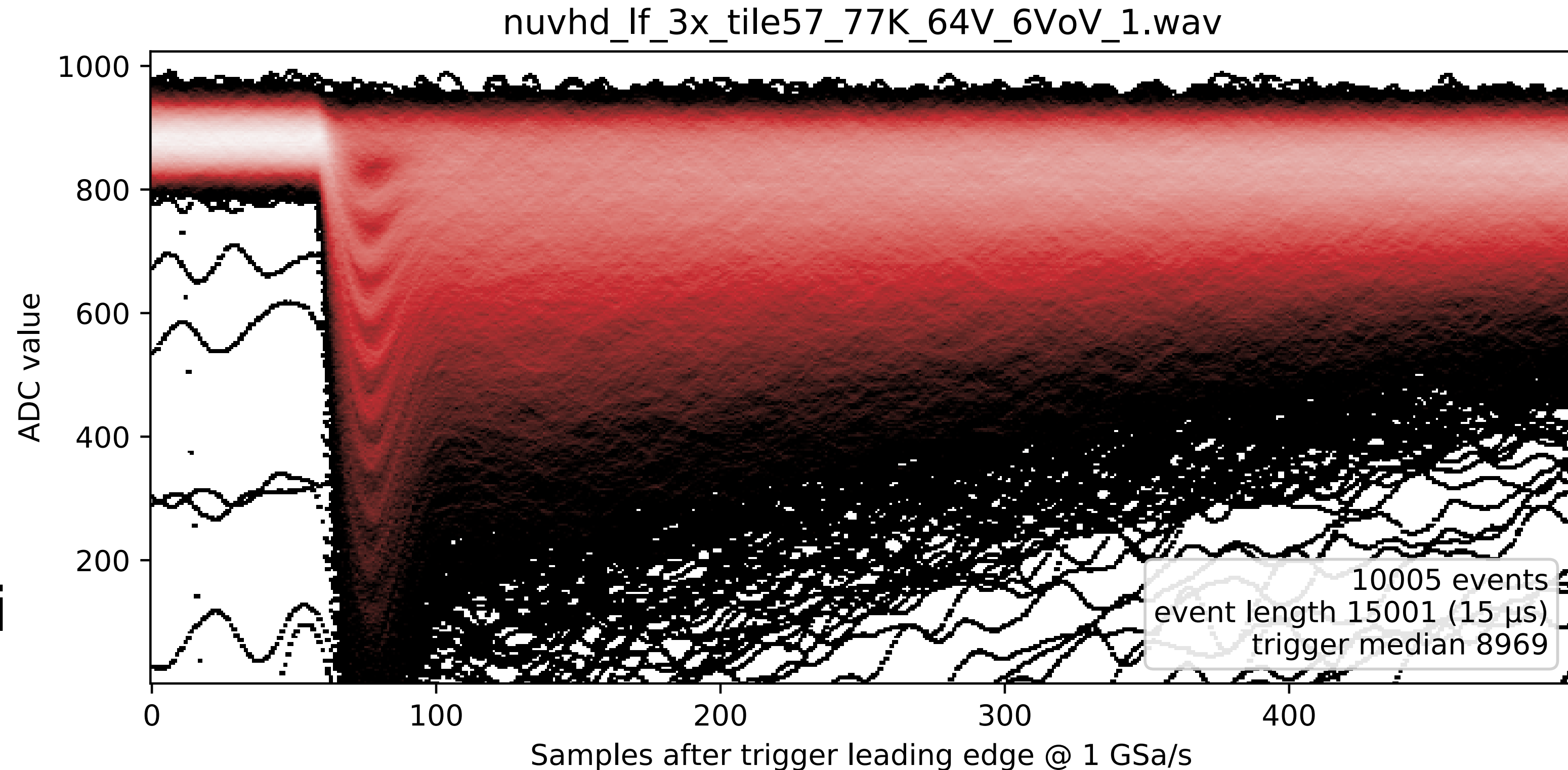
Principali vantaggi dei SiPM rispetto ai PMT:

- costo e semplicità
- radiopurezza

Svantaggi:

- rumore elettrico (perché ho sommato tanti fotodiodi)
- rumore correlato: un fotodiodo fa scattare i fotodiodi vicini, oppure dei portatori di carica intrappolati fanno partire un impulso ritardato

Nella tesi ho misurato le fonti di rumore e studiato il loro effetto.



# Studi sul rumore elettrico



# Studi sul rumore elettrico

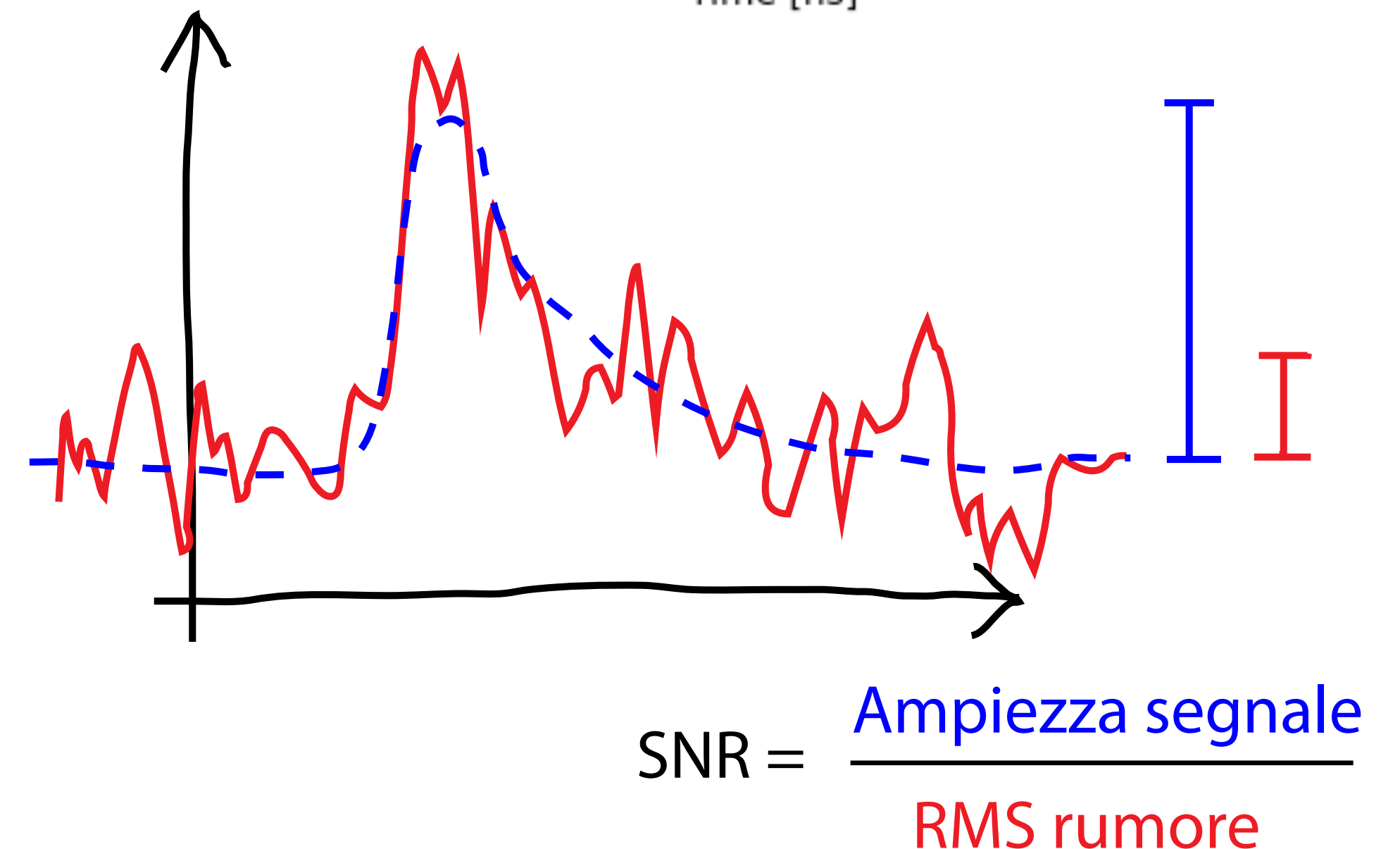
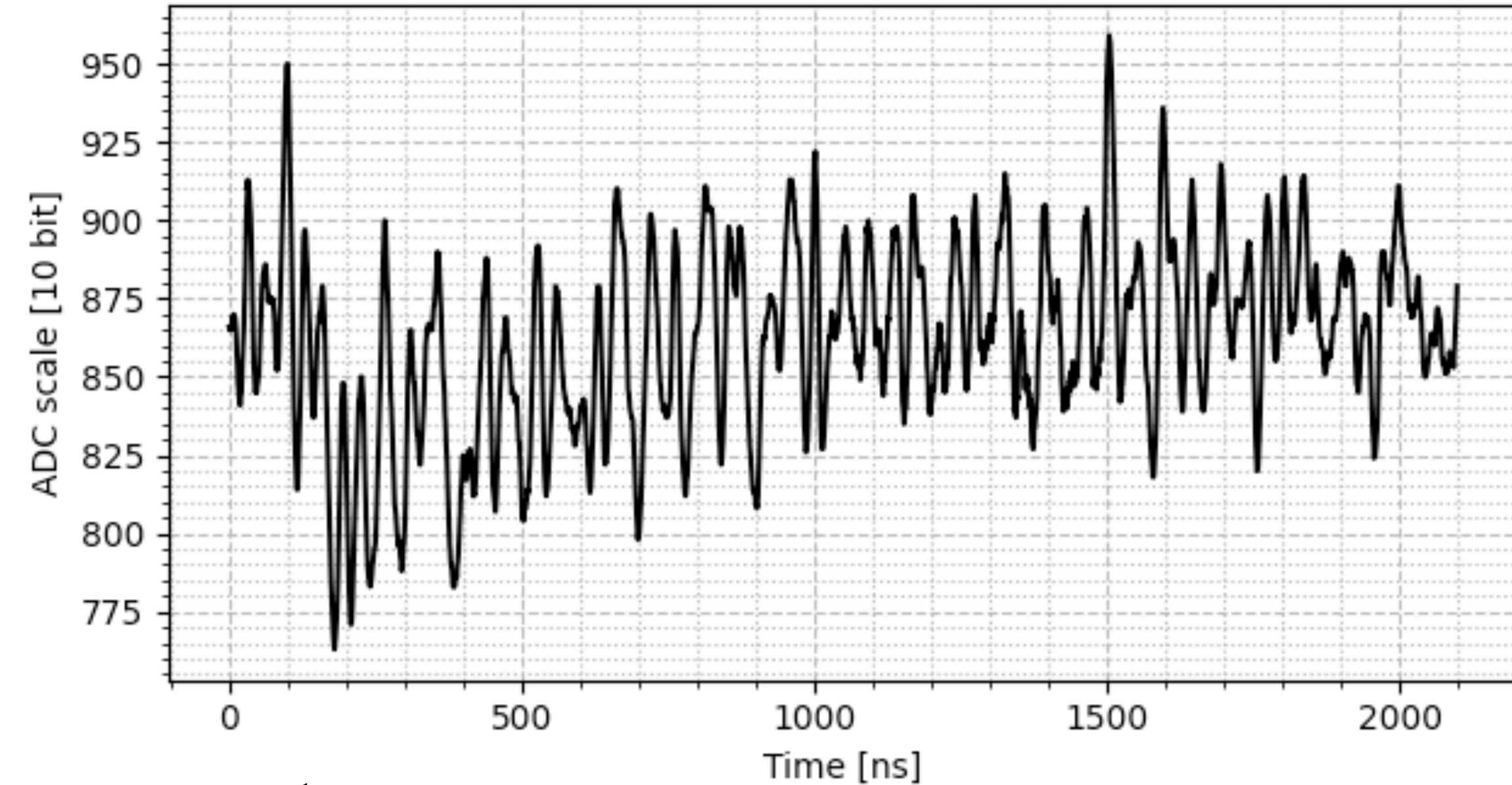
L'elevato rumore elettrico rende necessario usare dei filtri per trovare i segnali nell'output.

Le prestazioni si misurano con il rapporto segnale/rumore (SNR), ovvero il rapporto tra l'ampiezza degli impulsi e la deviazione standard del rumore.

Studi:

- Miglioramento dell'SNR con il filtraggio
- Risoluzione temporale
- Tasso di falsi segnali (rumore che supera la soglia per caso)

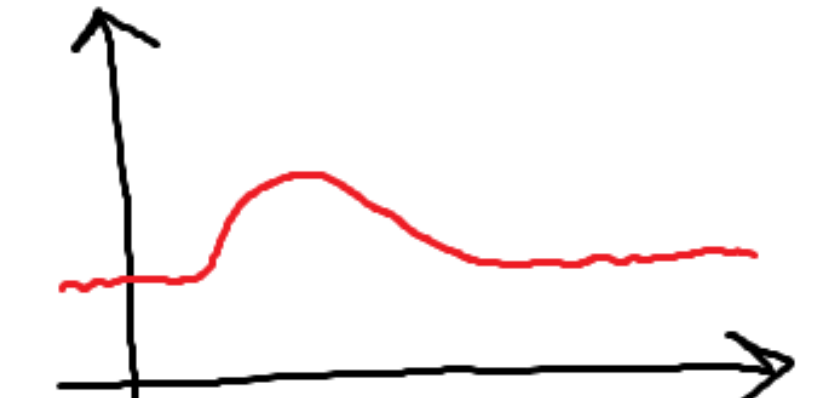
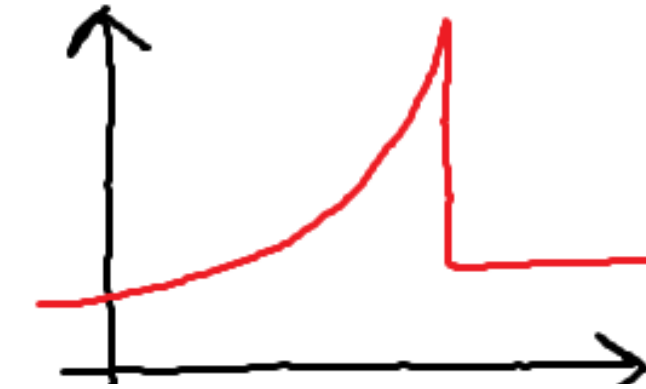
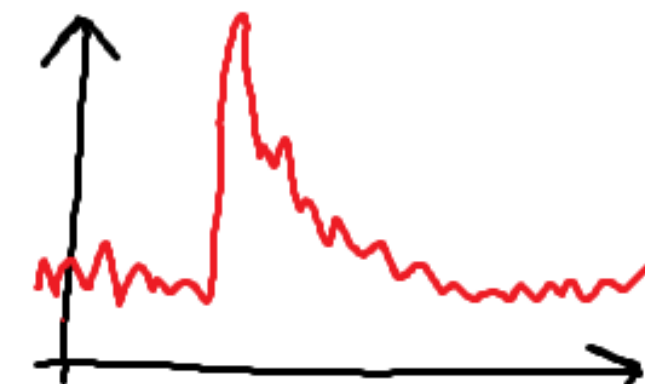
Singolo segnale: si vede poco nel rumore



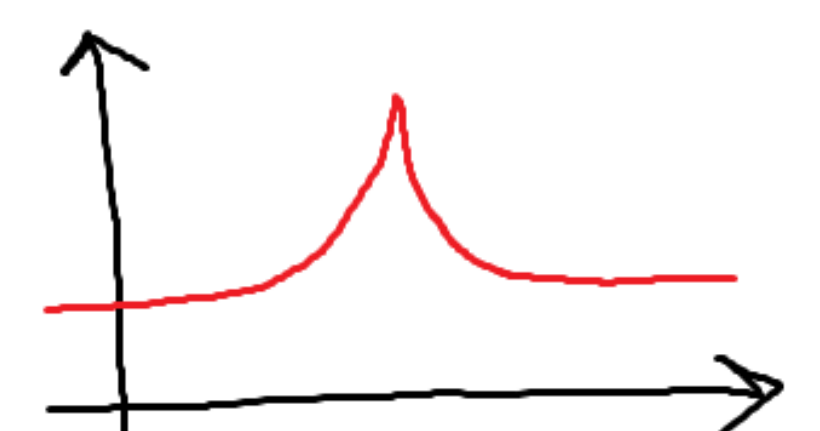
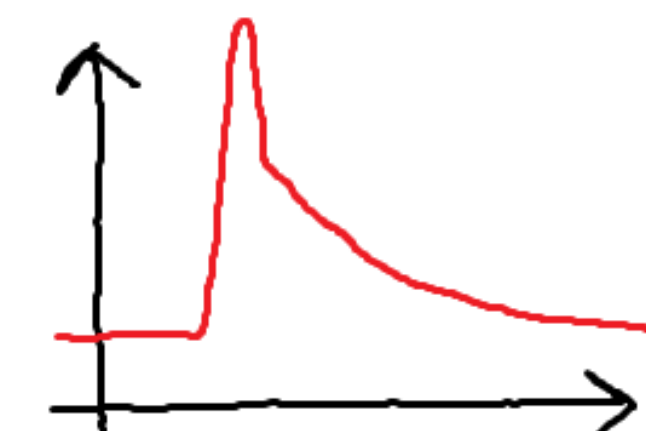
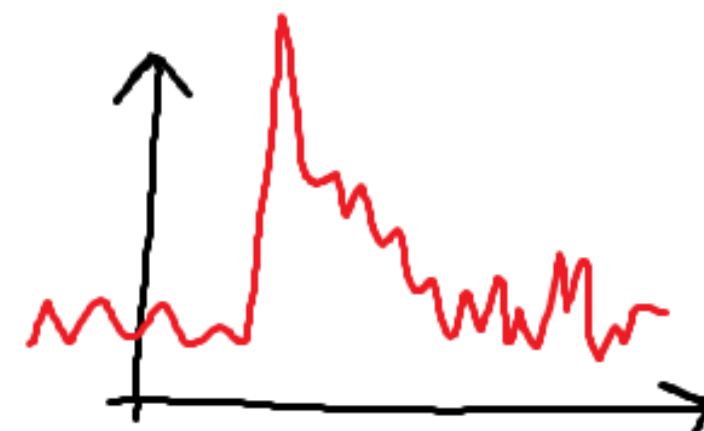
# Filtri

I filtri lineari si possono scrivere come la correlazione incrociata (convoluzione con inversione temporale) dell'input con un template. I filtri che proviamo sono:

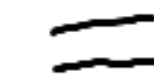
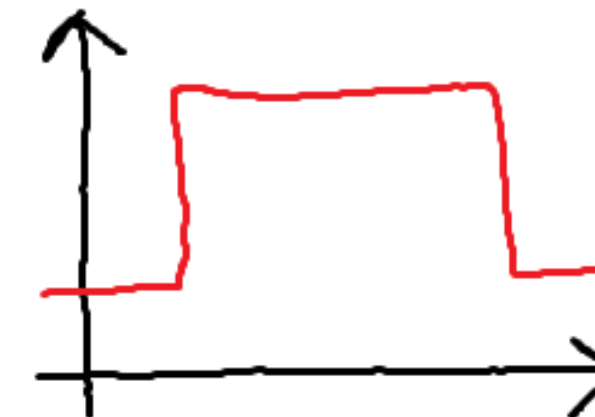
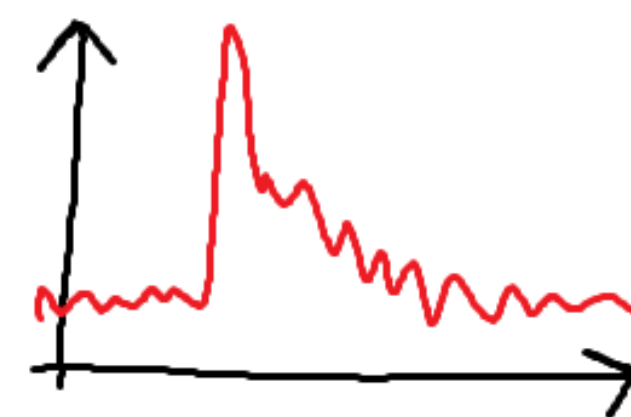
Media esponenziale (veloce):



Filtro accoppiato (quasi ottimale):



Media mobile (compromesso):



La velocità di calcolo è importante perché ci sono tanti canali da leggere ( $\approx 8000$ ).



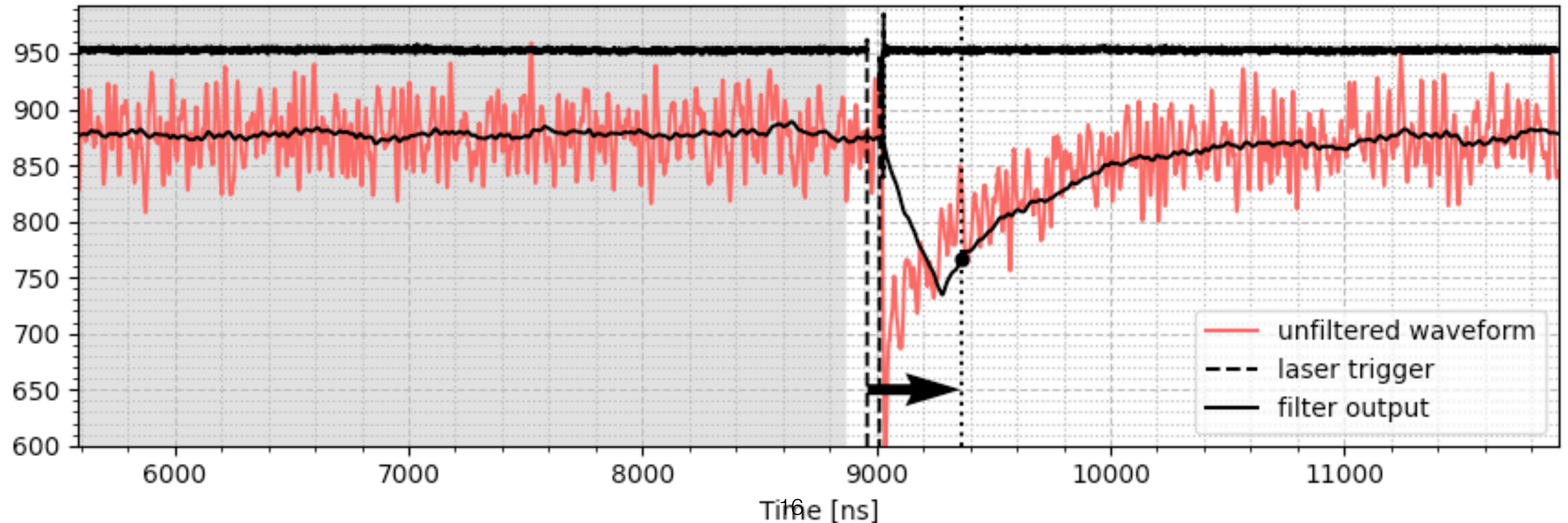
# SNR

# SNR (1/3)

Ho un elenco di "eventi" registrati, ogni evento contiene un impulso prodotto da un laser che colpisce il fotorivelatore.

SNR = ampiezza impulso / dev. st.  
rumore *dopo aver applicato il filtro*

Per misurare l'ampiezza degli impulsi non posso prendere il picco perché ci sarebbe un bias dovuto al rumore -> prendo il valore a tempo fissato, e calcolo al variare del punto

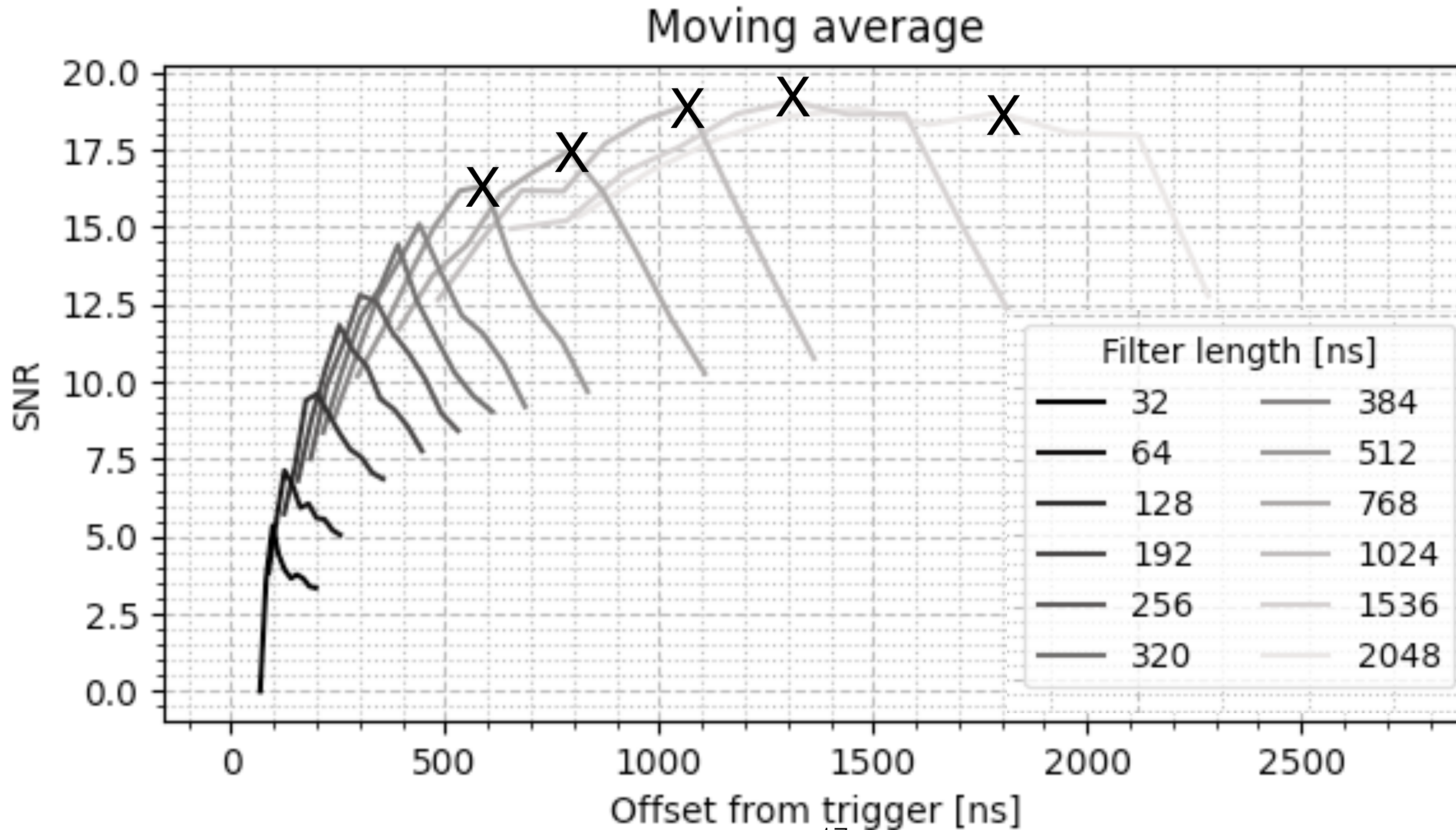




# SNR (2/3)

"SNR" vs. dove calcolo l'ampiezza rispetto al trigger.

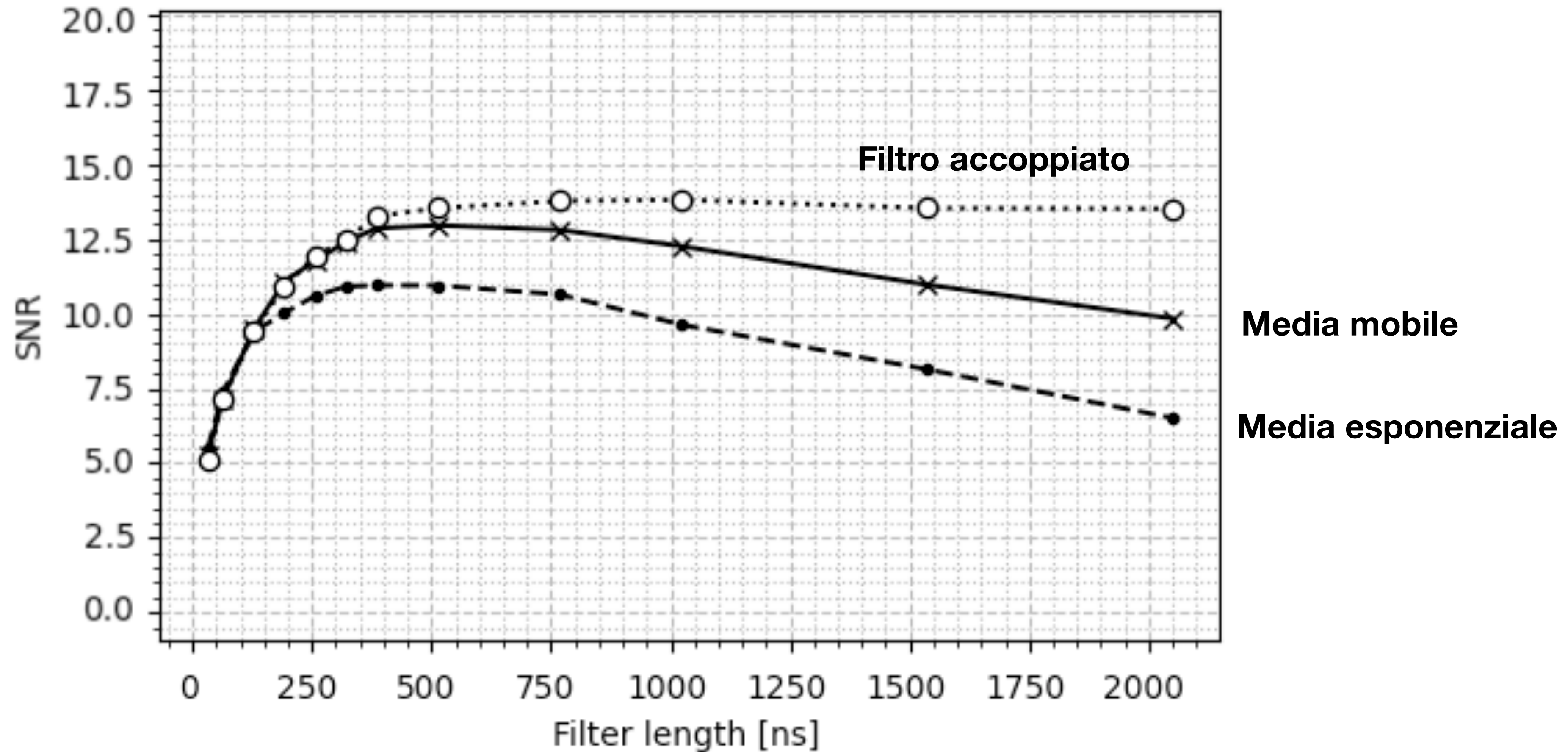
L'SNR è il massimo della curva. Una curva per ogni configurazione del filtro.



# SNR (3/3)

Gli SNR ottenuti per ogni filtro. Ogni curva è per un tipo di filtro, l'asse x indica quanto è lungo il filtro.

La media mobile funziona bene quasi quanto il filtro accoppiato.





# Risoluzione temporale

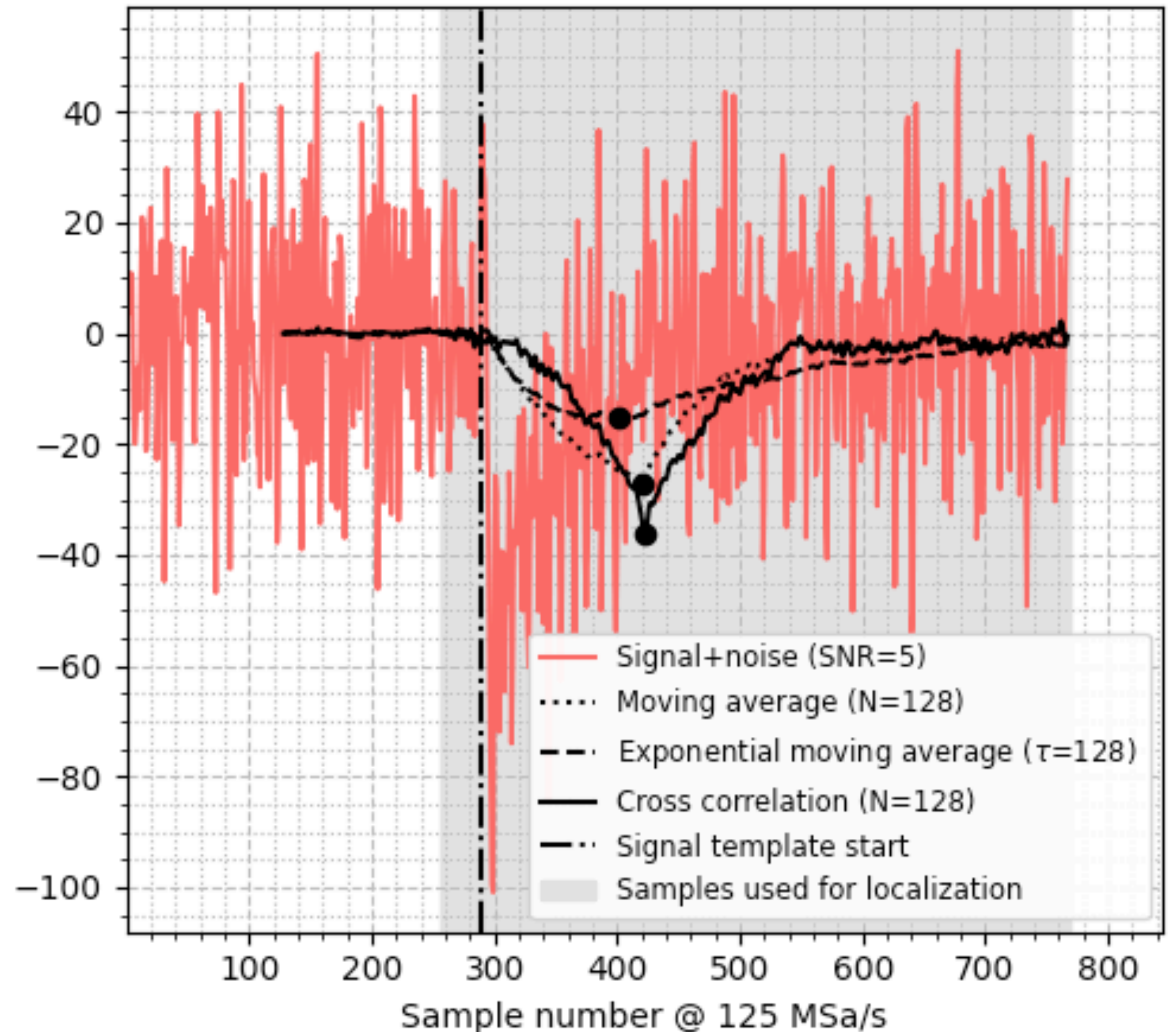
# Risoluzione temporale (1/3)

Anziché misurarla sui dati la misuro in una simulazione, perché:

1. Voglio essere sicuro dell'istante preciso in cui arriva il segnale;
2. Voglio decidere io l'SNR.

Estraggo il rumore e la forma degli impulsi dai dati e li ri assemblo opportunamente per creare degli eventi sintetici.

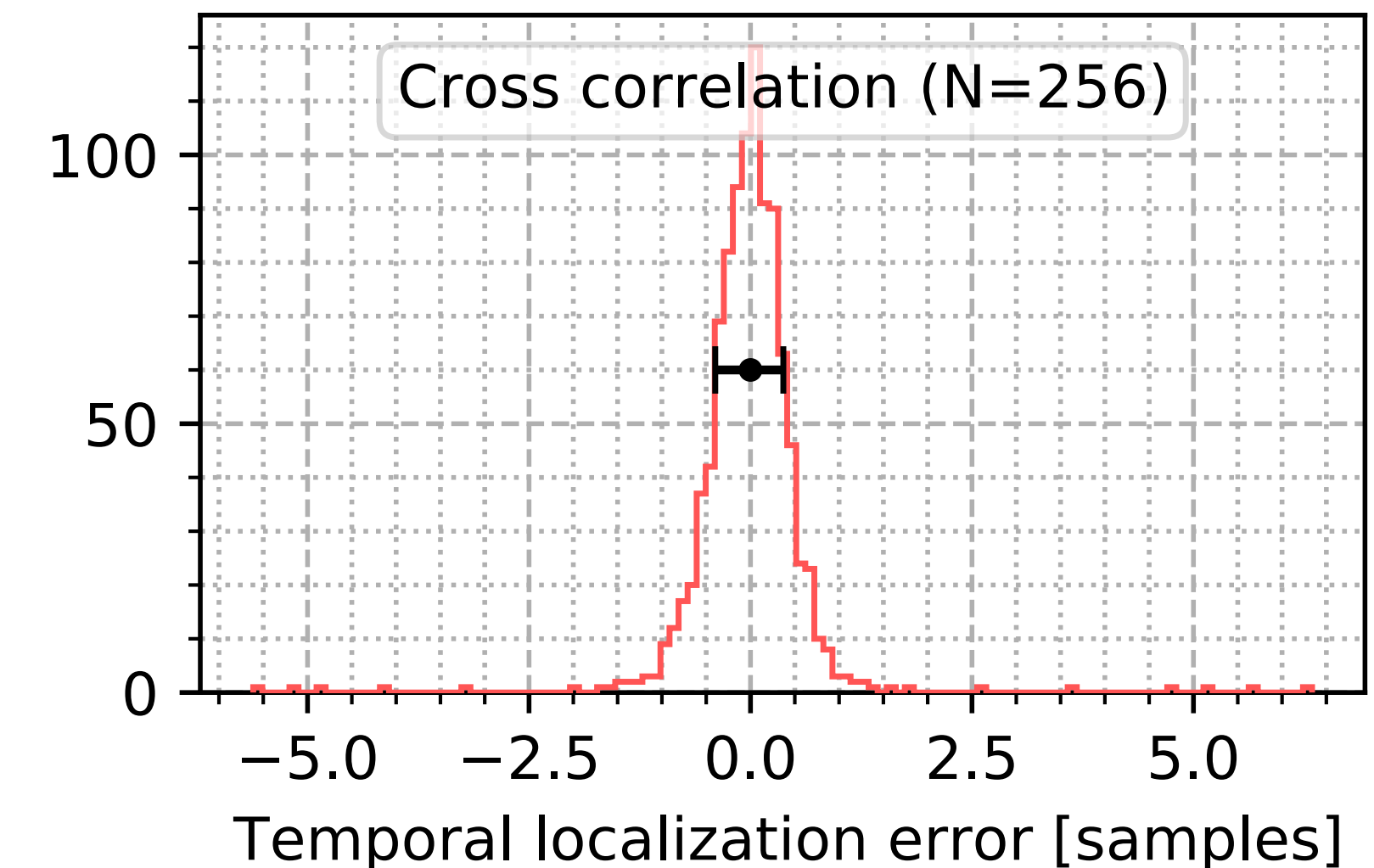
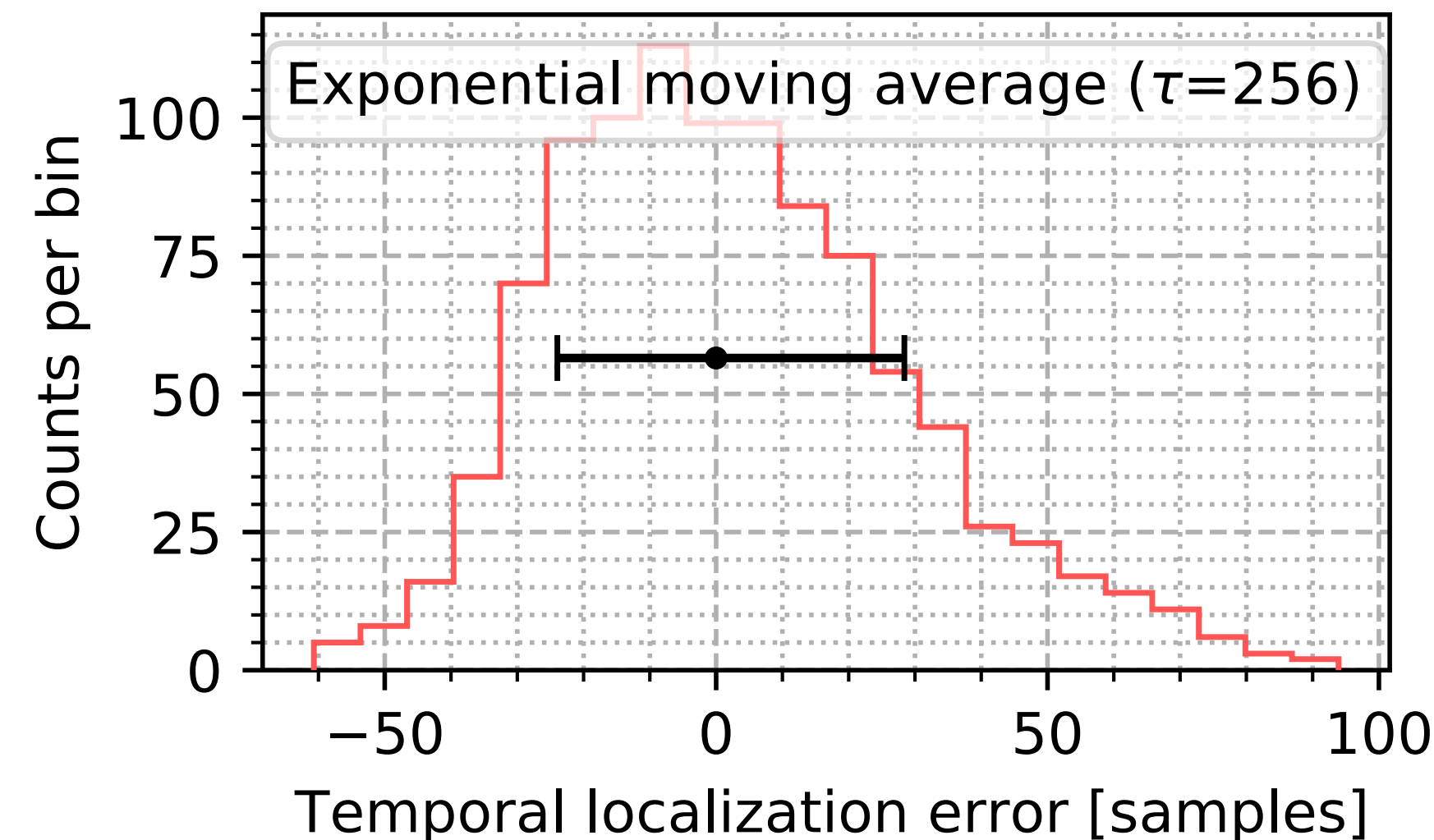
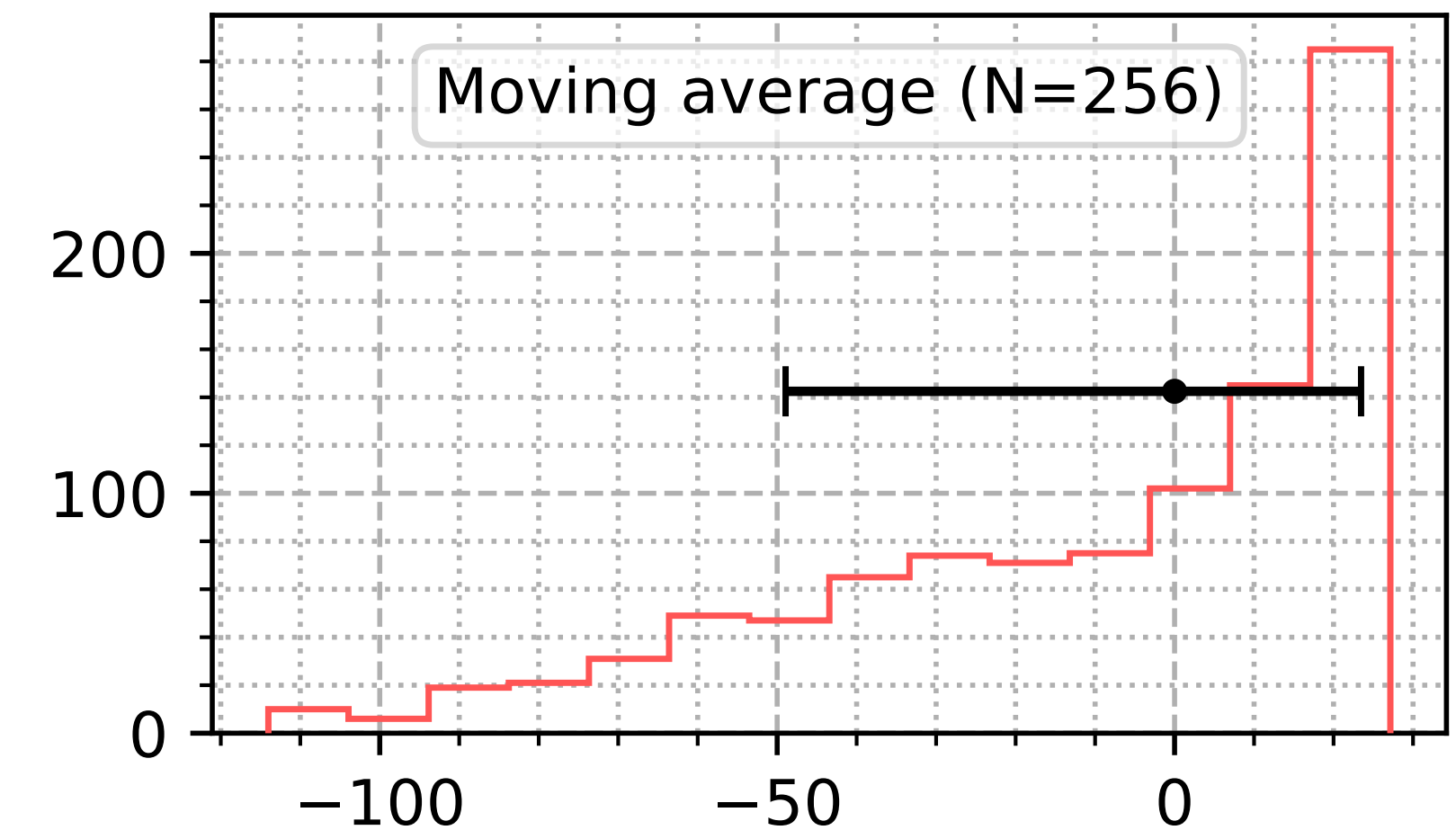
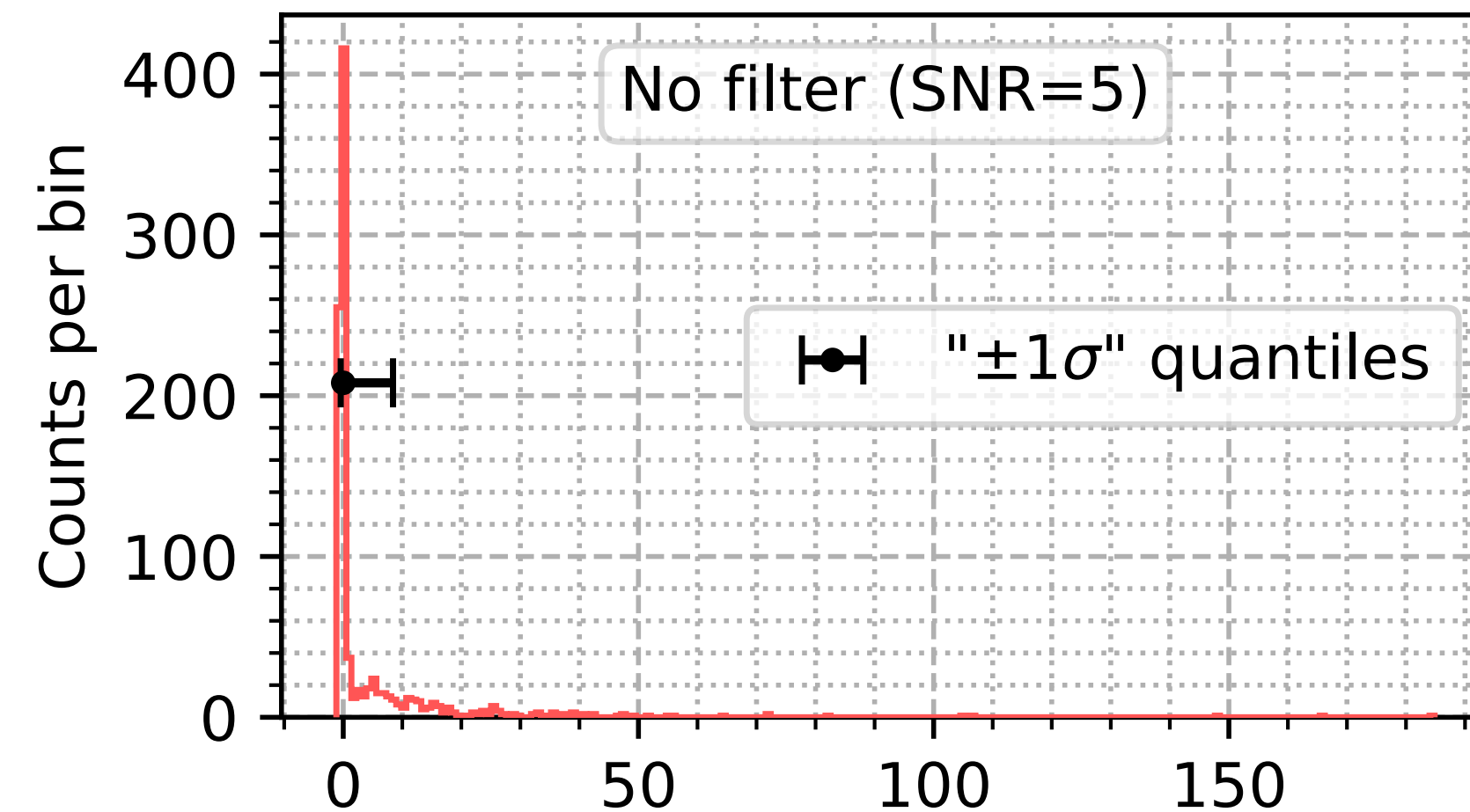
Per determinare l'istante temporale, prendo la posizione del minimo della forma d'onda filtrata.



# Risoluzione temporale (2/3)

Faccio l'istogramma della distribuzione della posizione ripetendo tante volte la simulazione, per ogni filtro e SNR.

La risoluzione la definisco come la semilarghezza della distribuzione, calcolata con i quantili (= 1 sigma se è gaussiana)

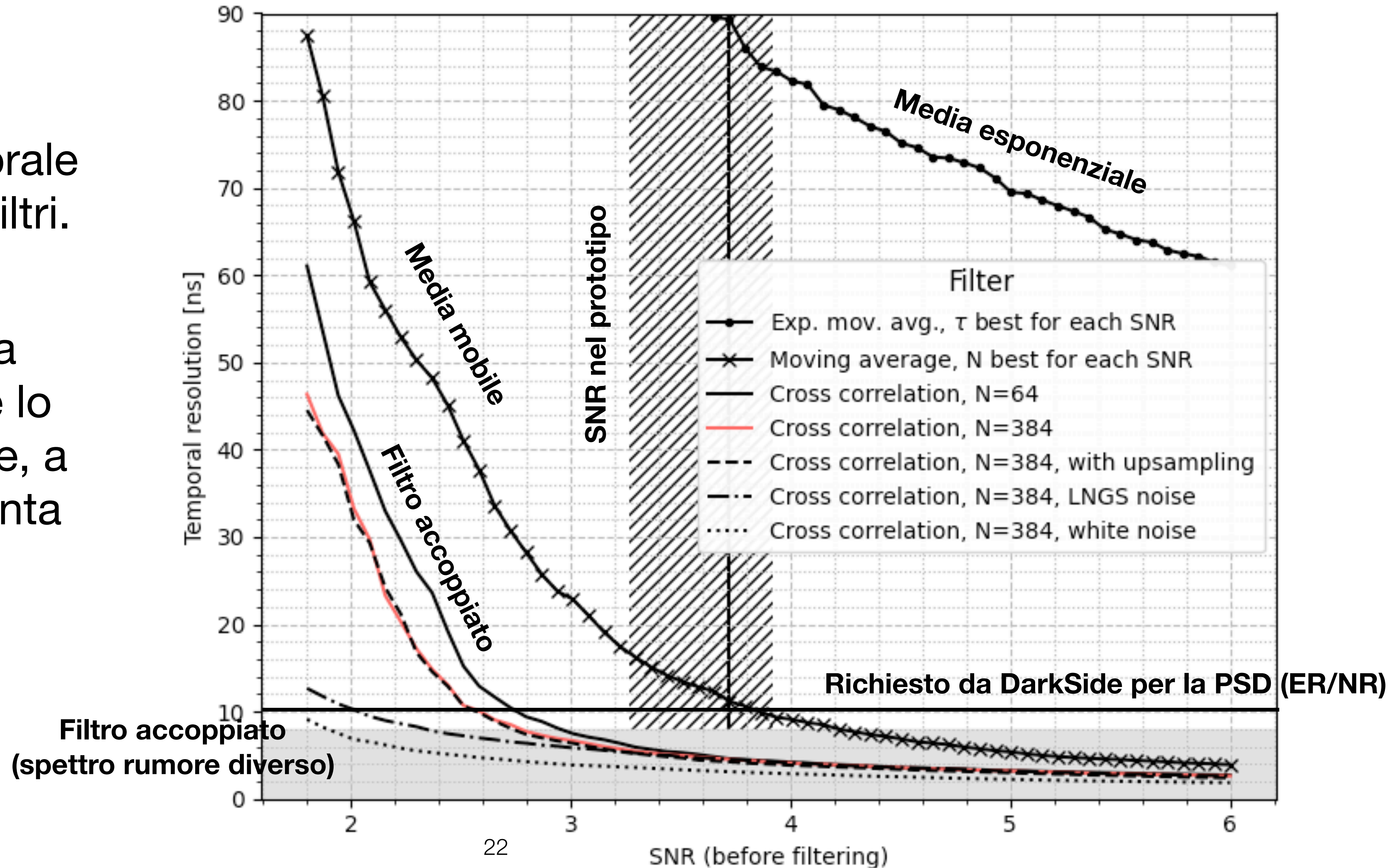




# Risoluzione temporale (3/3)

Grafico con risoluzione temporale vs. SNR per vari filtri.

In questo caso cambiare il filtro fa più effetto. Anche lo spettro del rumore, a parità di RMS, conta molto.



# Tasso di falsi segnali



# Tasso di falsi segnali (1/3)

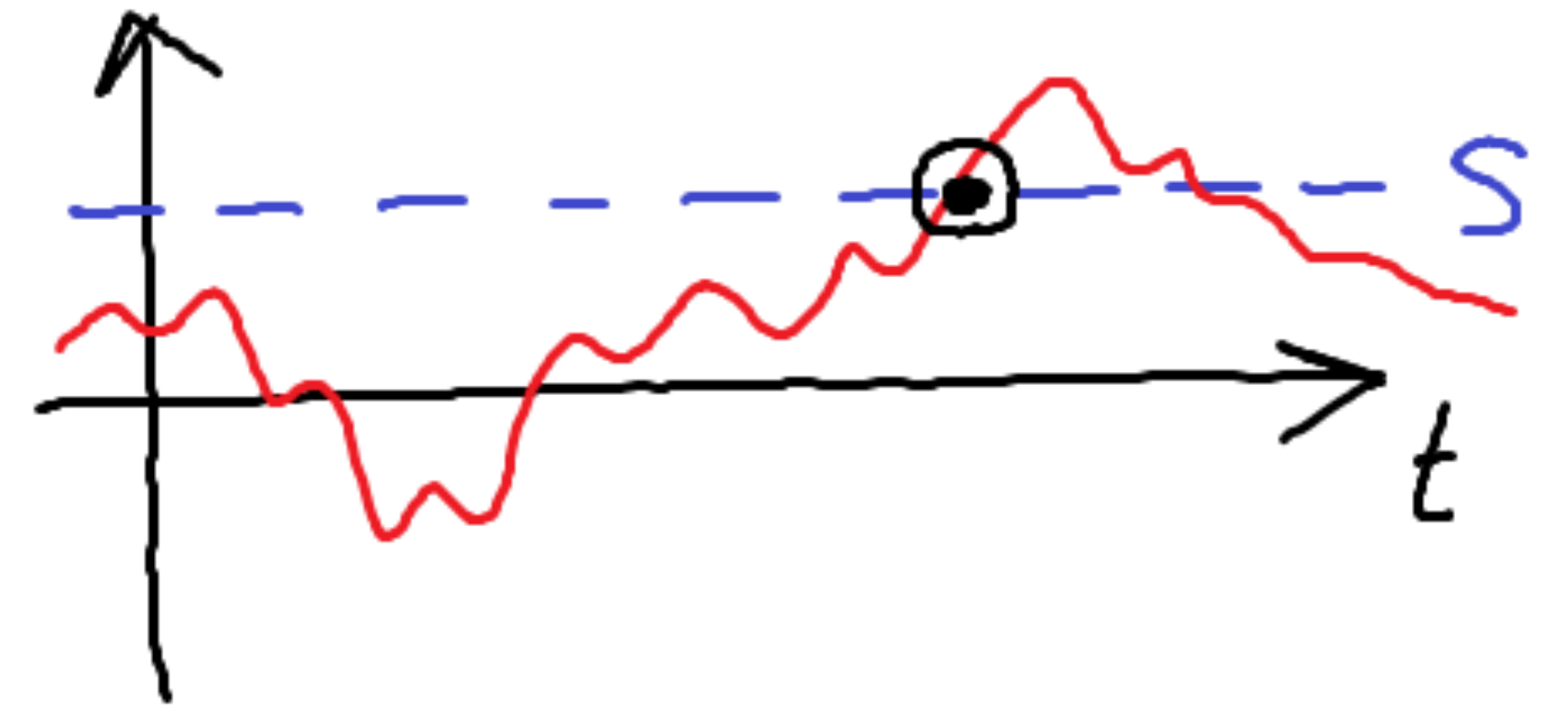
Il tasso di falsi va tenuto basso, quindi per misurarlo occorrerebbe registrare a lungo. Allora invece registro pochi dati e uso un modello per estrapolare.

Il rumore è Gaussiano, ma la probabilità di superare la soglia  $s$  non la posso calcolare con l'integrale Gaussiano da  $s$  a  $\infty$ , perché il rumore è autocorrelato.

In altre parole: ogni volta che il rumore supera la soglia, non torna subito giù, ci mette un po'. La formula da usare è questa:

$$\text{tasso} = (\text{freq. campionamento}) \cdot \frac{\sqrt{-k_2}}{2\pi\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}(s/\sigma)^2\right),$$

$$k_2 = \text{Cov}[y, y''] = \text{Cov}[y_i, y_{i+1} + y_{i-1} - 2y_i]$$

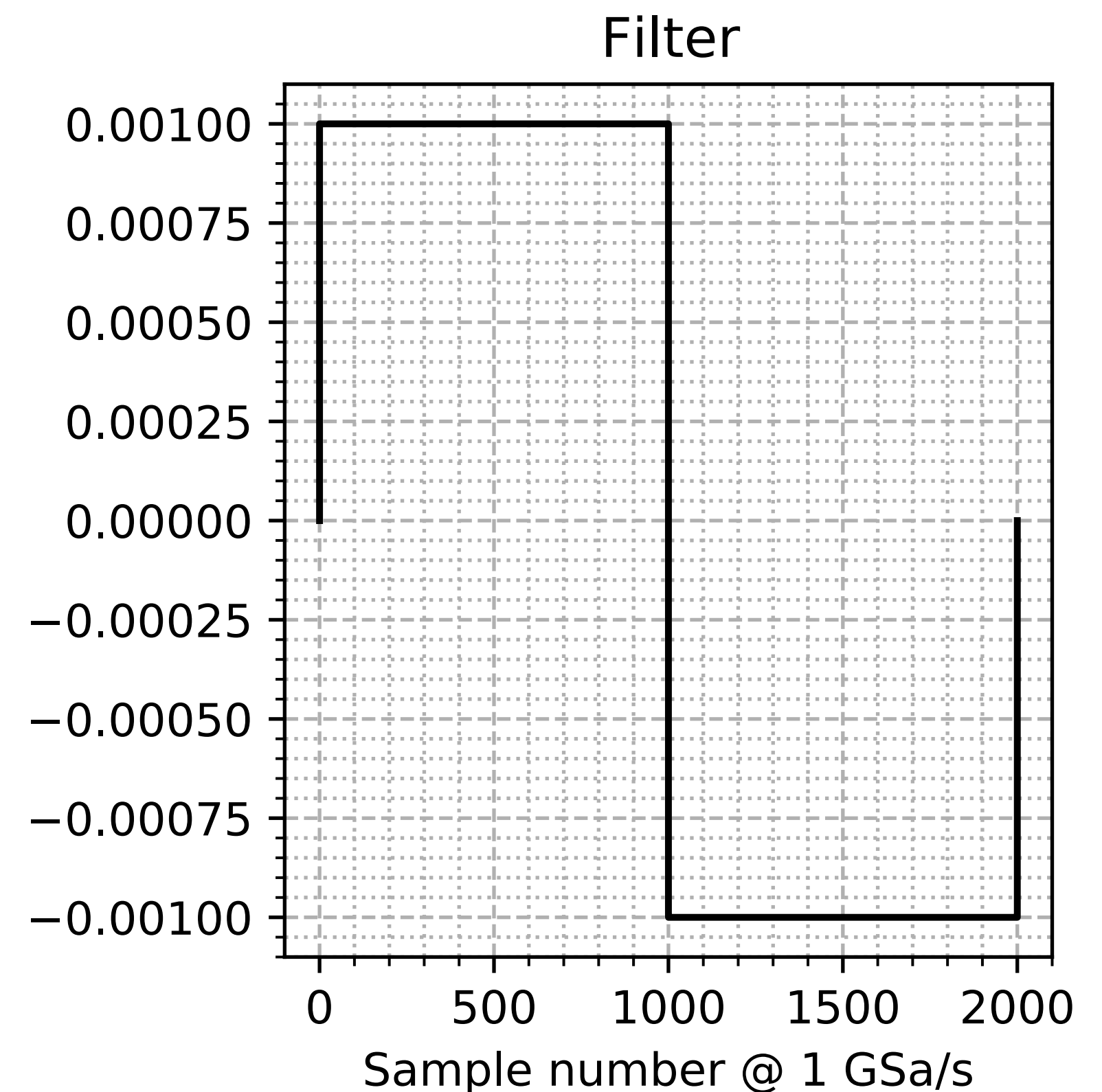
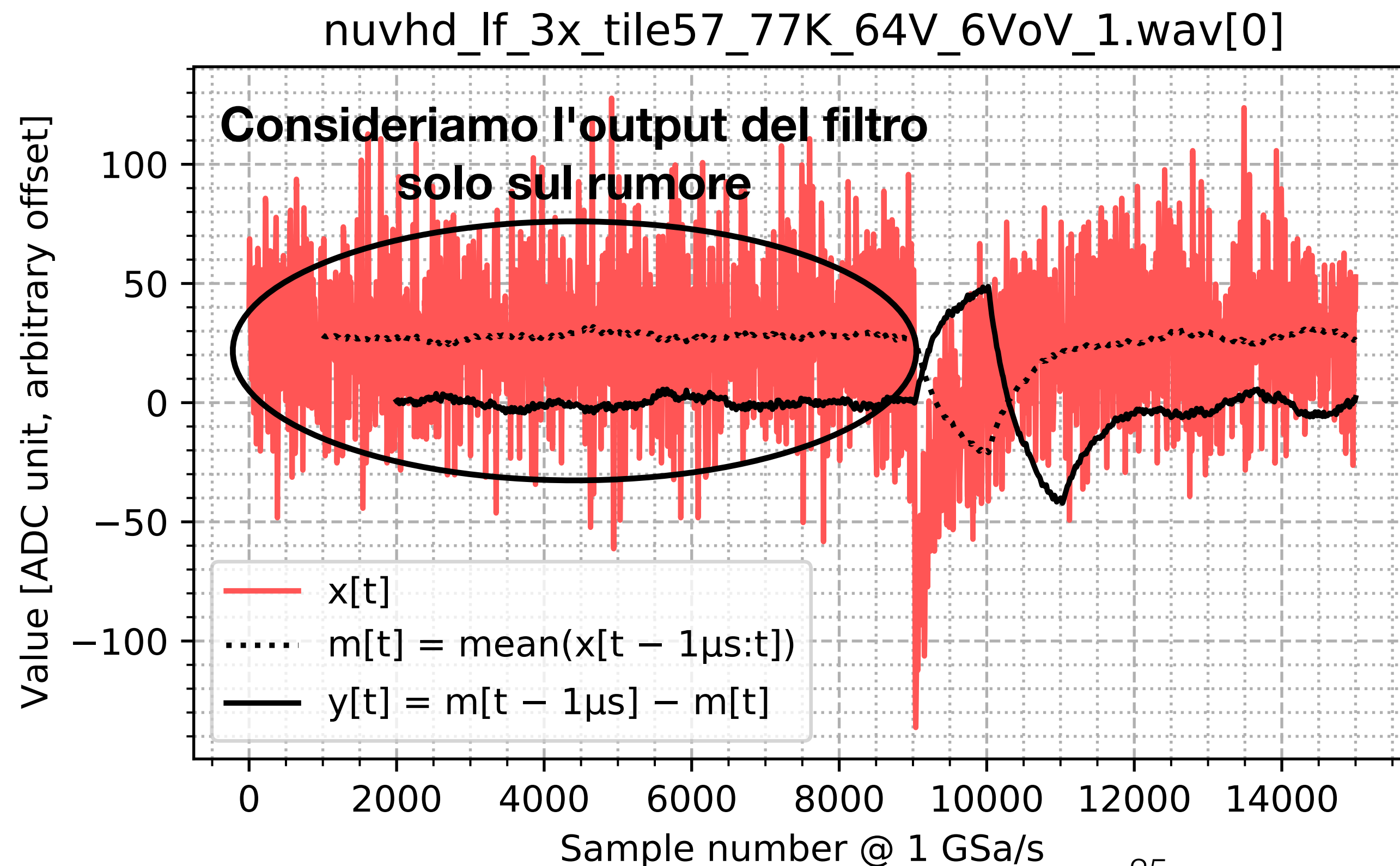


# Tasso di falsi segnali (2/3)

Misuro il tasso sui dati per verificare la formula.

Uso un solo filtro per far prima, media mobile da  $1 \mu\text{s}$ .

Tengo anche conto del fatto che bisogna calcolare la "baseline" per calcolare l'ampiezza: quindi alla fine il filtro è fatto così:

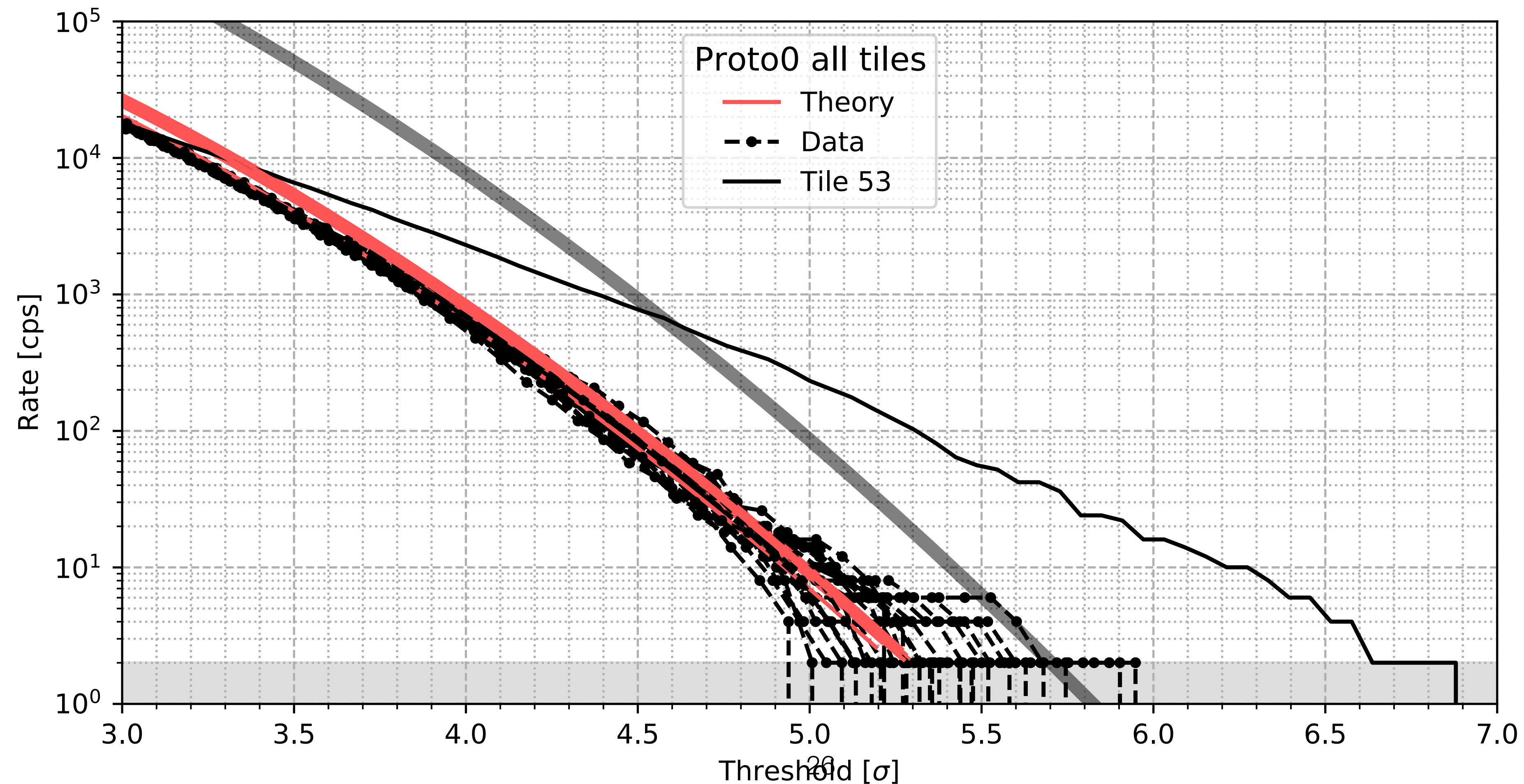




# Tasso di falsi segnali (3/3)

Grafico tasso di falsi vs. soglia, fatto per tanti fotorivelatori, confrontando misura e modello.

Il modello è adeguato, però c'è una matrice di SiPM con un tasso più alto del previsto.



# Misura del rumore correlato



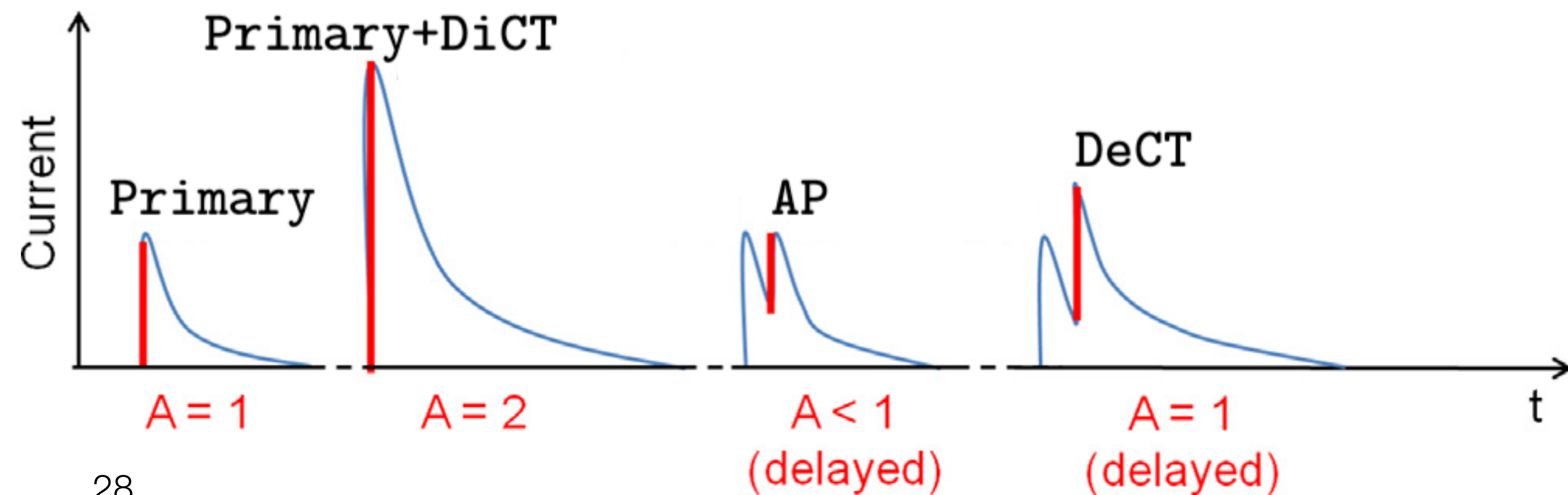
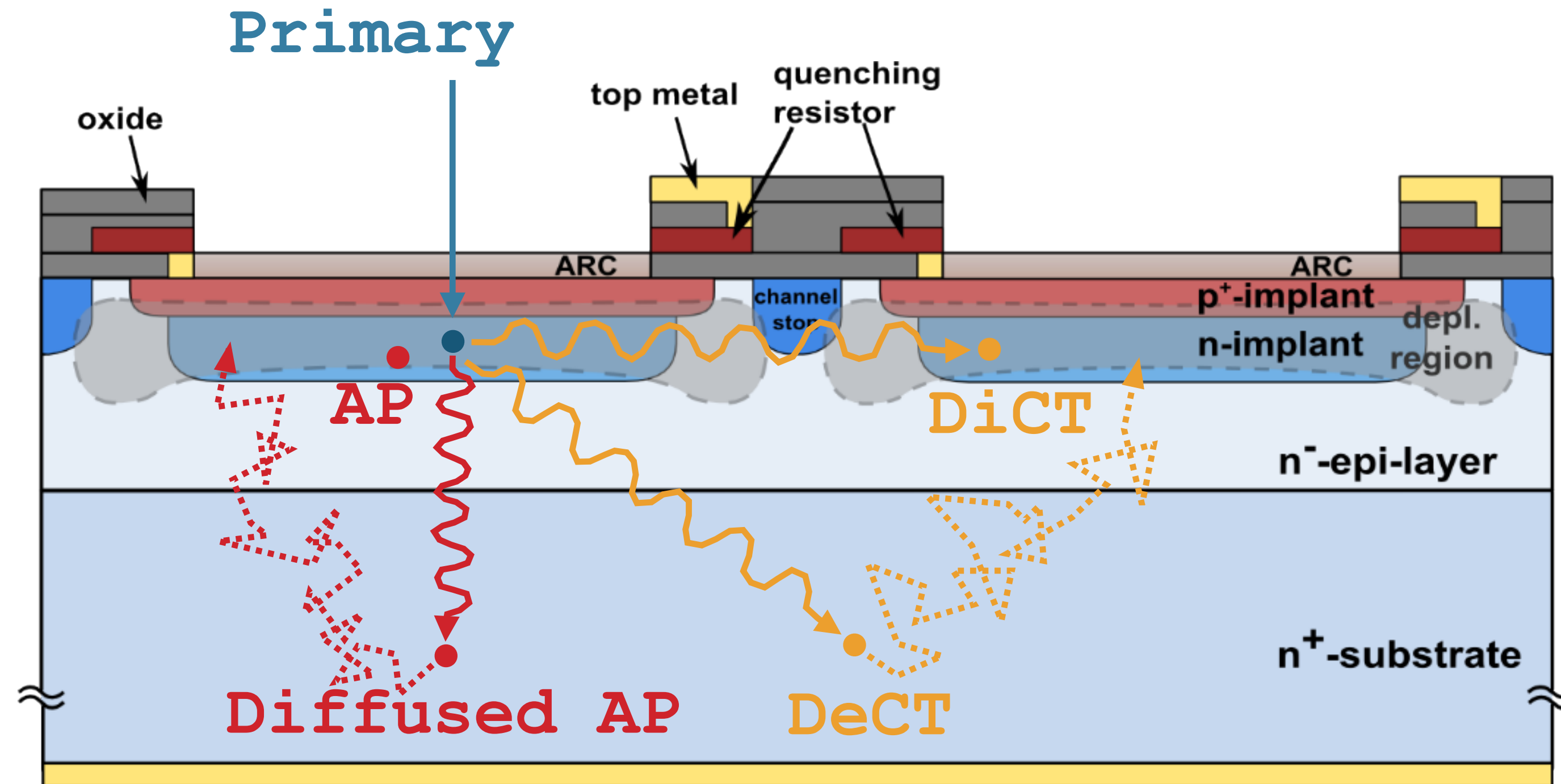
# Rumore correlato nei SiPM

DiCT = cross talk diretto: i fotoni emessi dalla corrente in un fotodiiodo fanno scattare un fotodiiodo vicino

AP = afterpulse: un portatore di carica rimane intrappolato nel fotodiiodo, e rilasciato casualmente più tardi facendo partire un'altra scarica.

DeCT = cross talk ritardato: non lo misuro perché ha una probabilità piccola.

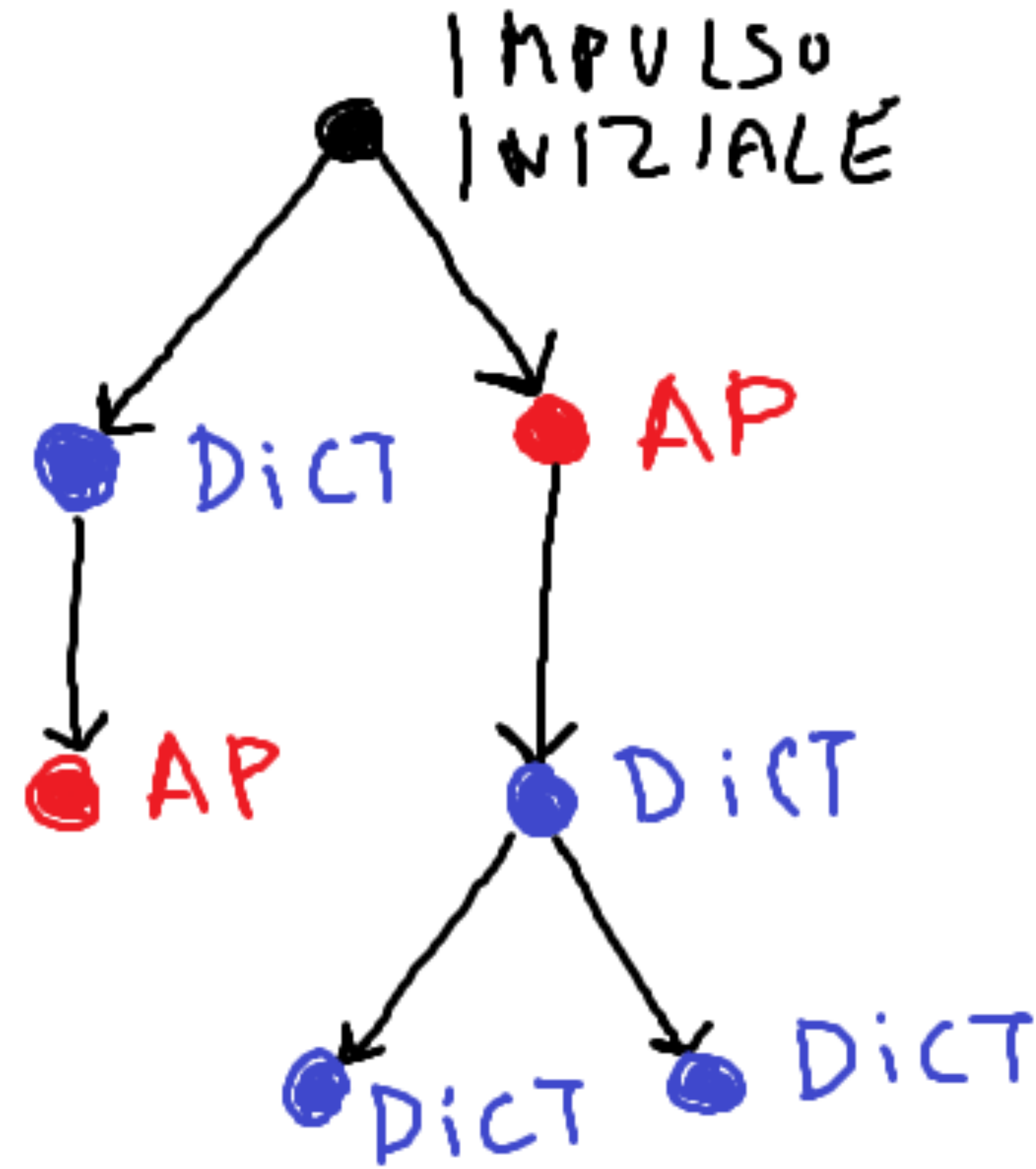
Per fare le misure usiamo i filtri studiati prima per individuare gli impulsi nei dati.



# Modello degli impulsi secondari

Mi serve un modello per il rumore correlato perché poi viene usato nella simulazione dell'esperimento, e perché alcune misure sono abbastanza complicate da richiedere un modello esplicito.

A loro volta gli impulsi di DiCT e AP possono produrre impulsi terziari, etc., come ipotesi semplificativa assumo che a ogni passaggio le distribuzioni di probabilità siano le stesse, cioè è un modello del tutto ricorsivo.





**DiCT (cross talk diretto)**

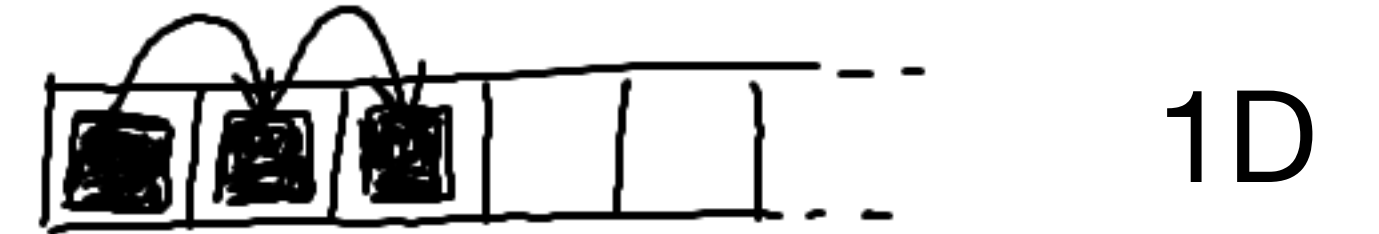
# Modello del DiCT

Due modelli:

1. Bernoulli: ogni cella può attivare 0 o 1 cella vicina, non di più.
2. Poisson: ogni cella attiva un numero Poissoniano di celle vicine.

Mi interessa la distribuzione per il *numero totale* di celle attivate, perché gli impulsi sono perfettamente sovrapposti nell'output. Nei due casi vengono:

1. Distribuzione geometrica:  $P(k; p) = p^{k-1}(1 - p)$   
( $p$  = prob. di attivare la cella)
2. Distribuzione di Borel:  $P(k; \mu) = e^{-k\mu}(k\mu)^{k-1}/k!$   
( $\mu$  = numero medio di celle attivate a ogni passaggio)



1D



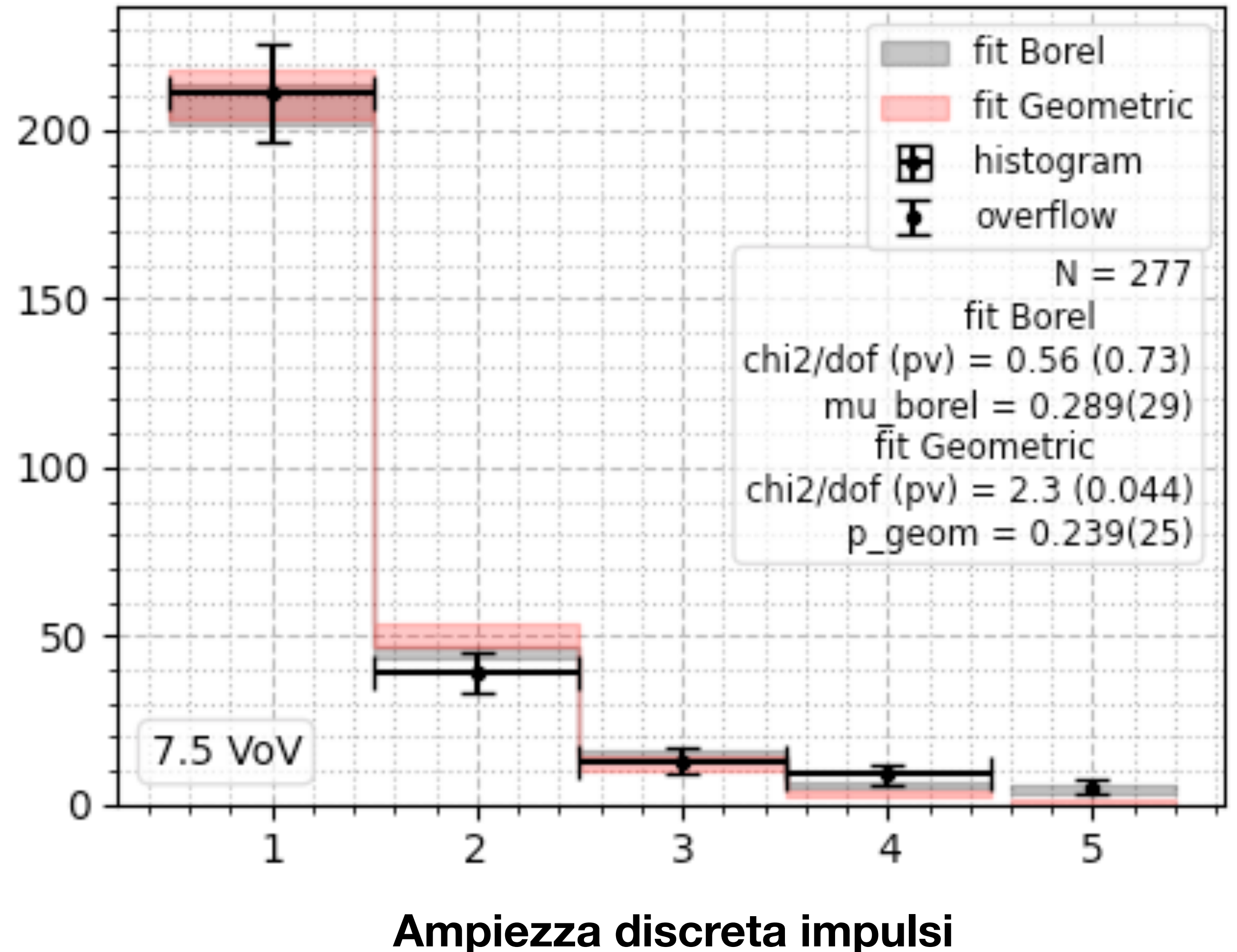
$\infty$ D



# Misura del DiCT

Seleziono degli impulsi e per ognuno determino l'ampiezza discreta = 1 + totale di DiCT.

Fitto l'istogramma con i modelli, determinando il parametro  $p$  o  $\mu$ .



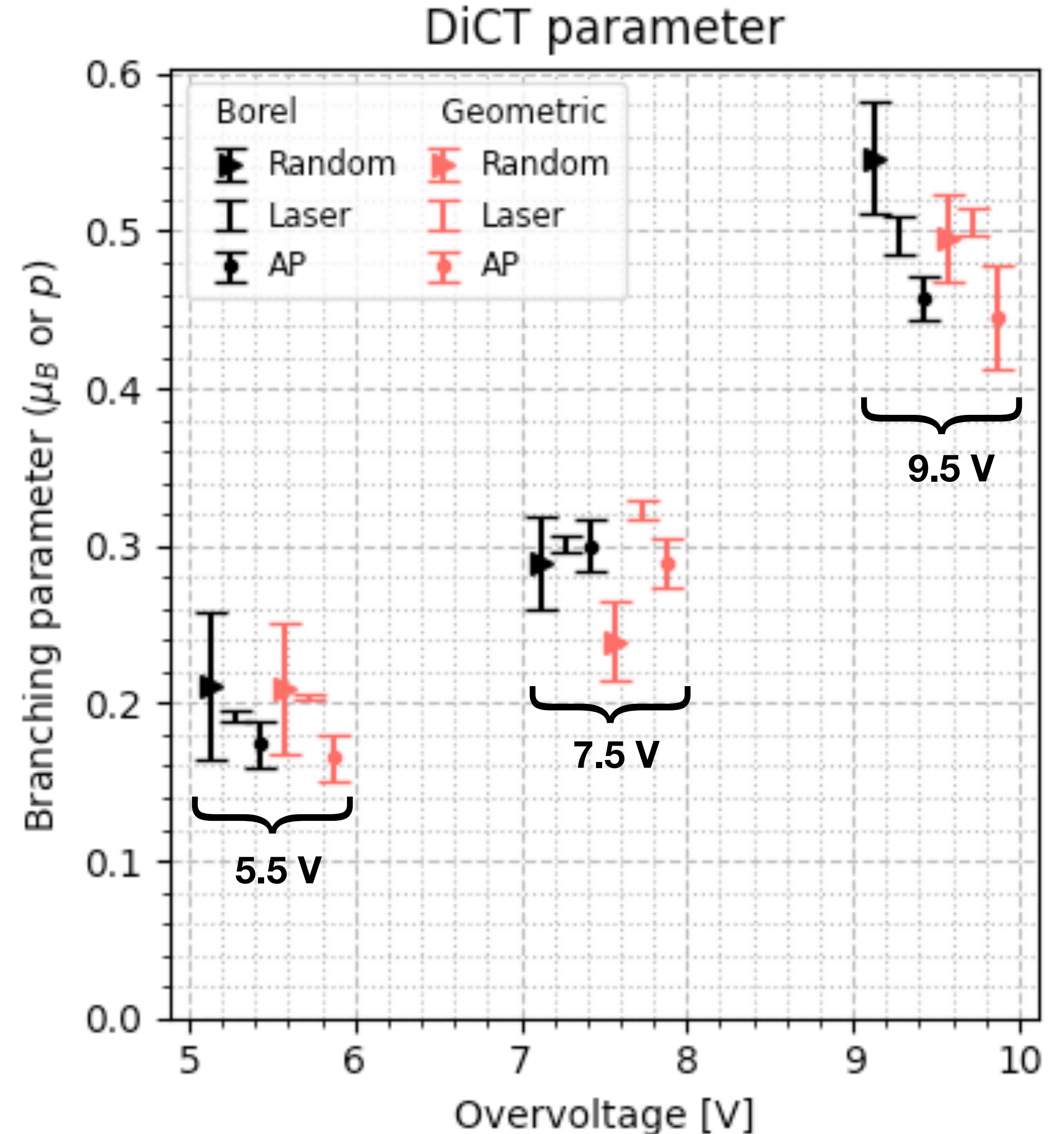
# Risultati DiCT

Ricordiamo che l'overvoltage è la tensione in eccesso a cui sono tenuti i fotodiodi rispetto a quella di rottura.

Il rumore correlato aumenta con l'overvoltage perché diminuisce l'energia necessaria per liberare un portatore di carica. Se non fosse per il rumore correlato, si potrebbe tenere un overvoltage più alto, aumentando l'SNR e l'efficienza.

Quindi ripetiamo la misura per vari overvoltage. Nel grafico è riportato il parametro del modello ( $p$  o  $\mu$ ) vs. overvoltage, ripetendo con selezioni diverse dei dati.

Il parametro è  $\approx$  la probabilità di avere  $\geq 1$  DiCT





**AP (afterpulse)**

# Modello degli AP

Assumo che ogni impulso può produrre al più un solo AP. Non è detto ma è un'ipotesi che semplifica l'analisi ed è quello che assumono a DarkSide.

Poiché gli impulsi sono ritardati, li posso distinguere individualmente dall'impulso padre.

La ricarica del fotodiodo è circa un  $RC$  perché la variazione di tensione è piccola rispetto al bias, quindi la capacità della giunzione cambia poco.

Allora l'ampiezza dell'afterpulse dovrebbe essere proporzionale a  $1 - \exp(-\Delta t/\tau_{rec})$ , dove  $\Delta t$  è il ritardo rispetto all'impulso padre. (Molto approssimativo in realtà.)

Il rilascio delle cariche intrappolate è un processo casuale, quindi la distribuzione temporale del ritardo degli afterpulse è un'esponenziale o una combinazione di esponenziali se ci sono più livelli energetici:

$$p(\Delta t) = \sum_i p_i \exp(-\Delta t/\tau_i)$$

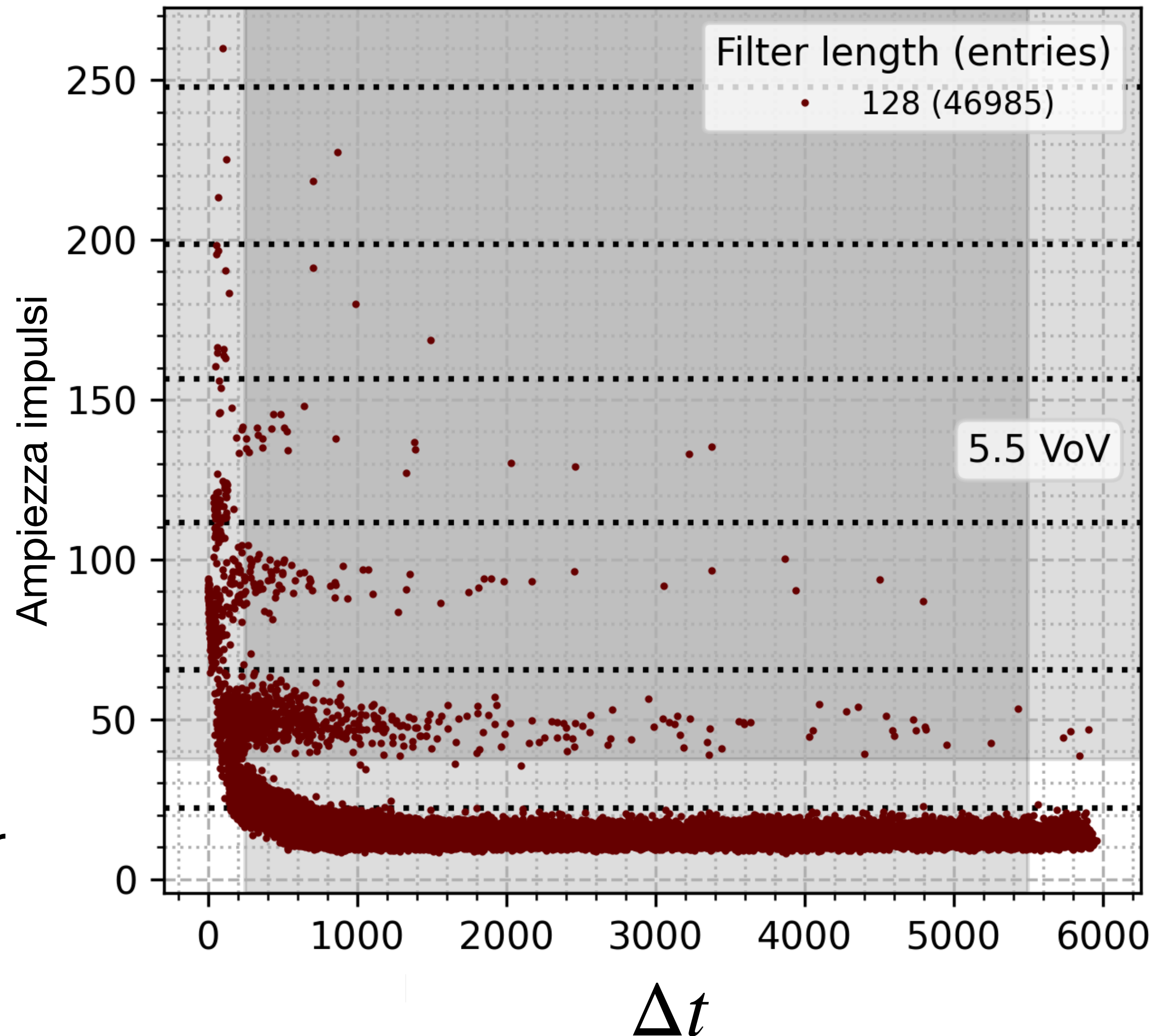
# Misura degli AP (1/2)

Grafico ampiezza dell'afterpulse vs. ritardo dal padre.

La strisciata più in basso sono picchi nel rumore casuale.

L'algorithmo per identificare i picchi funziona male per  $\Delta t$  piccolo, quindi considero solo gli afterpulse sopra un certo ritardo.

Alla fine gli afterpulse che considero per la misura sono quelli nel rettangolo grigio. Li conto e divido per il numero totale di eventi per determinare la probabilità di AP.



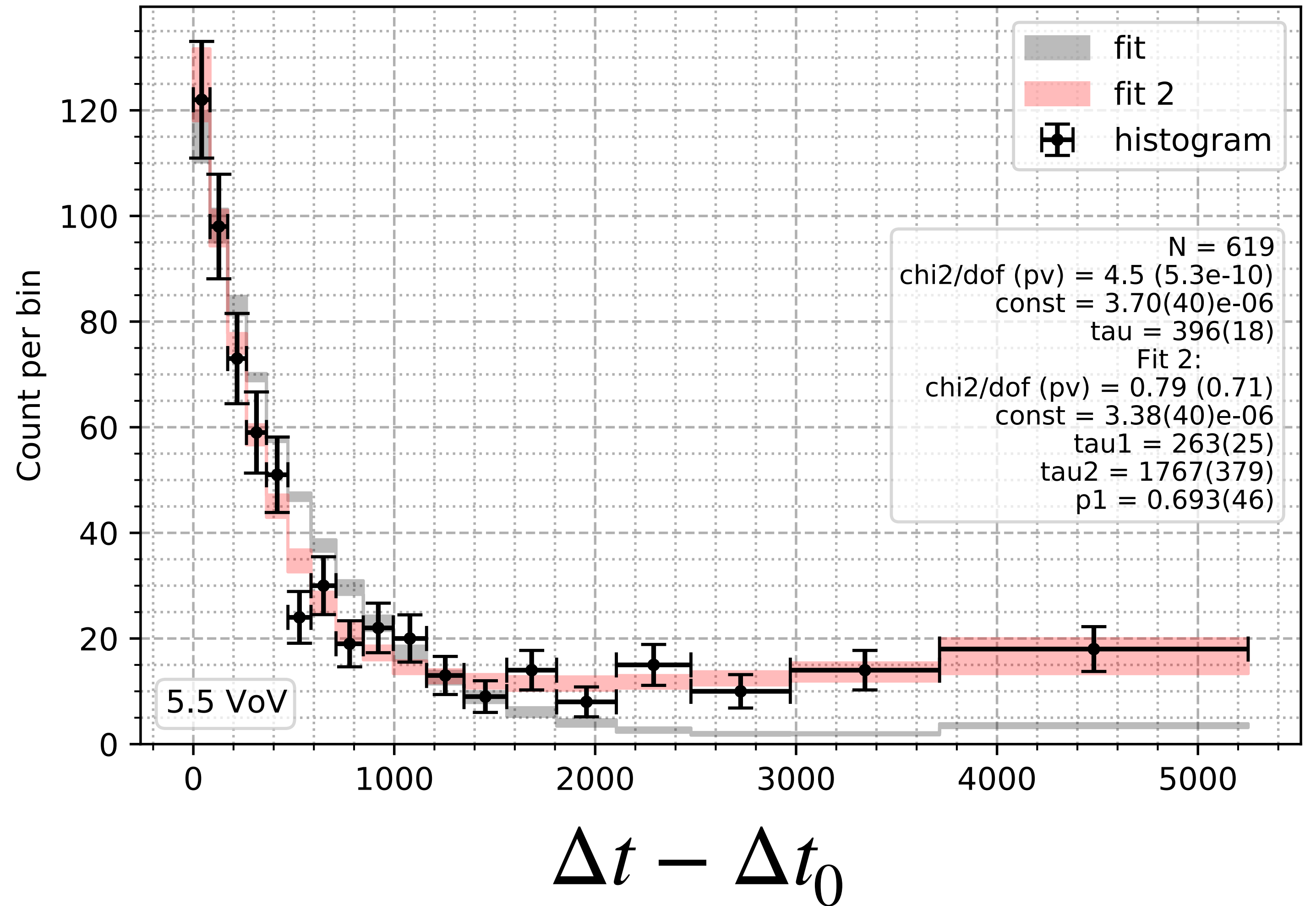


# Misura degli AP (2/2)

Essendo che ho contato solo gli AP con ritardo  $>$  di un certo  $\Delta t_0$ , devo aggiungere indirettamente quelli con  $\Delta t < \Delta t_0$ .

Faccio l'istogramma di  $\Delta t$ , fitto con il modello, e poi estrapolo fino a  $\Delta t = 0$ .

Il fit viene bene con 2 componenti esponenziali.

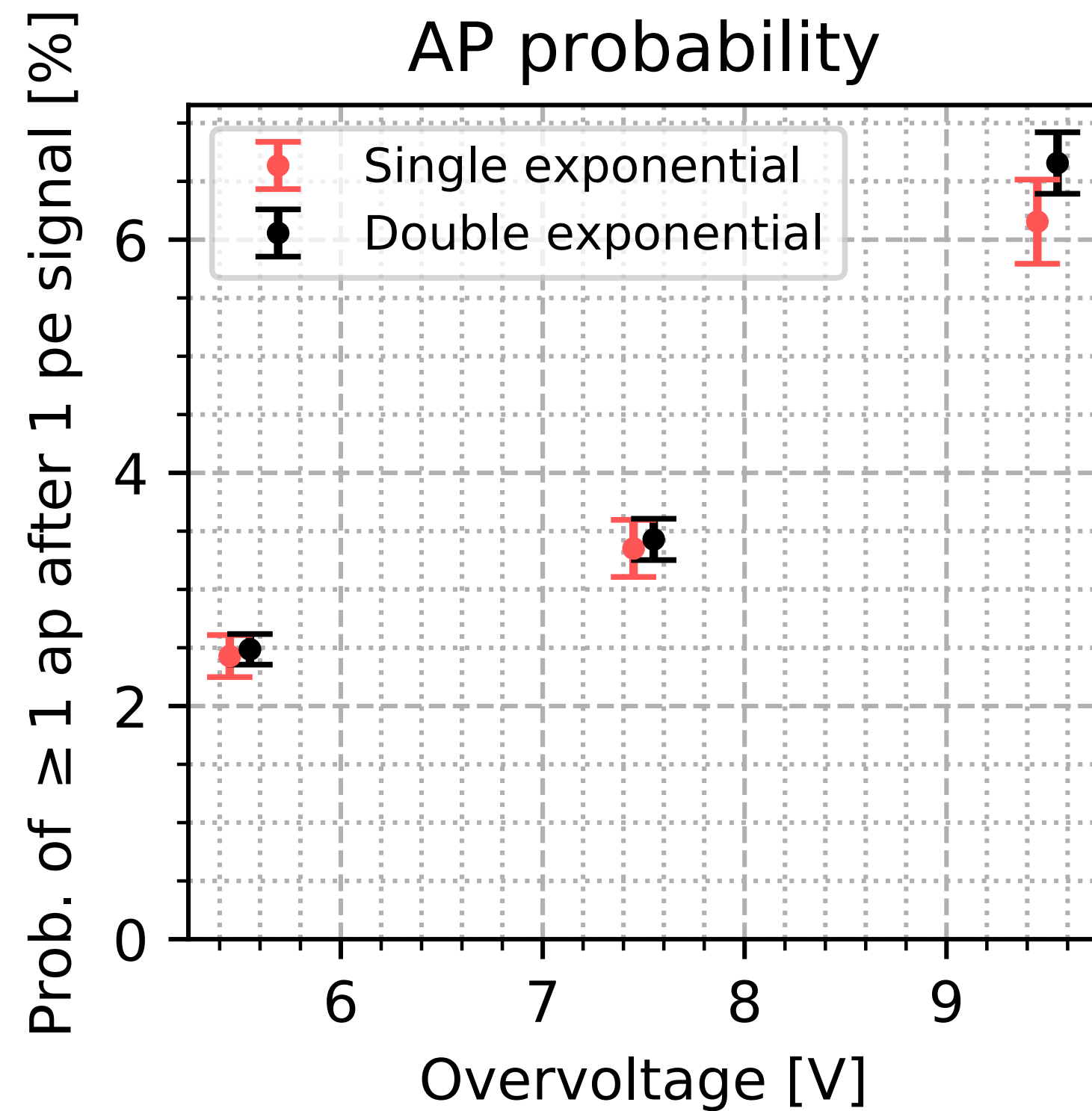


# Risultati AP

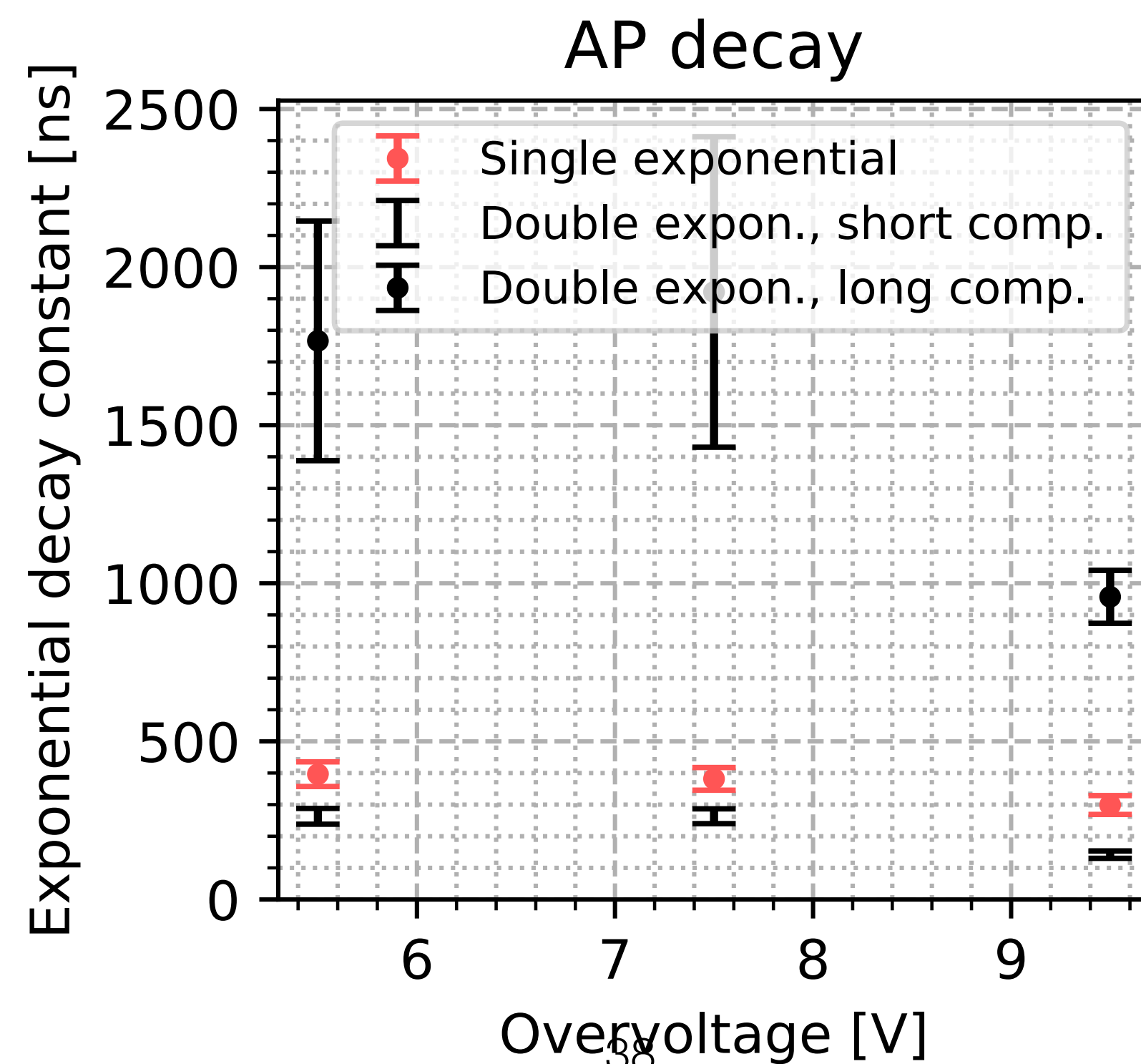
Le proprietà sembrano cambiare un po' all'overvoltage più alto.

$$p(\Delta t) = \sum_i p_i \exp(-\Delta t/\tau_i)$$

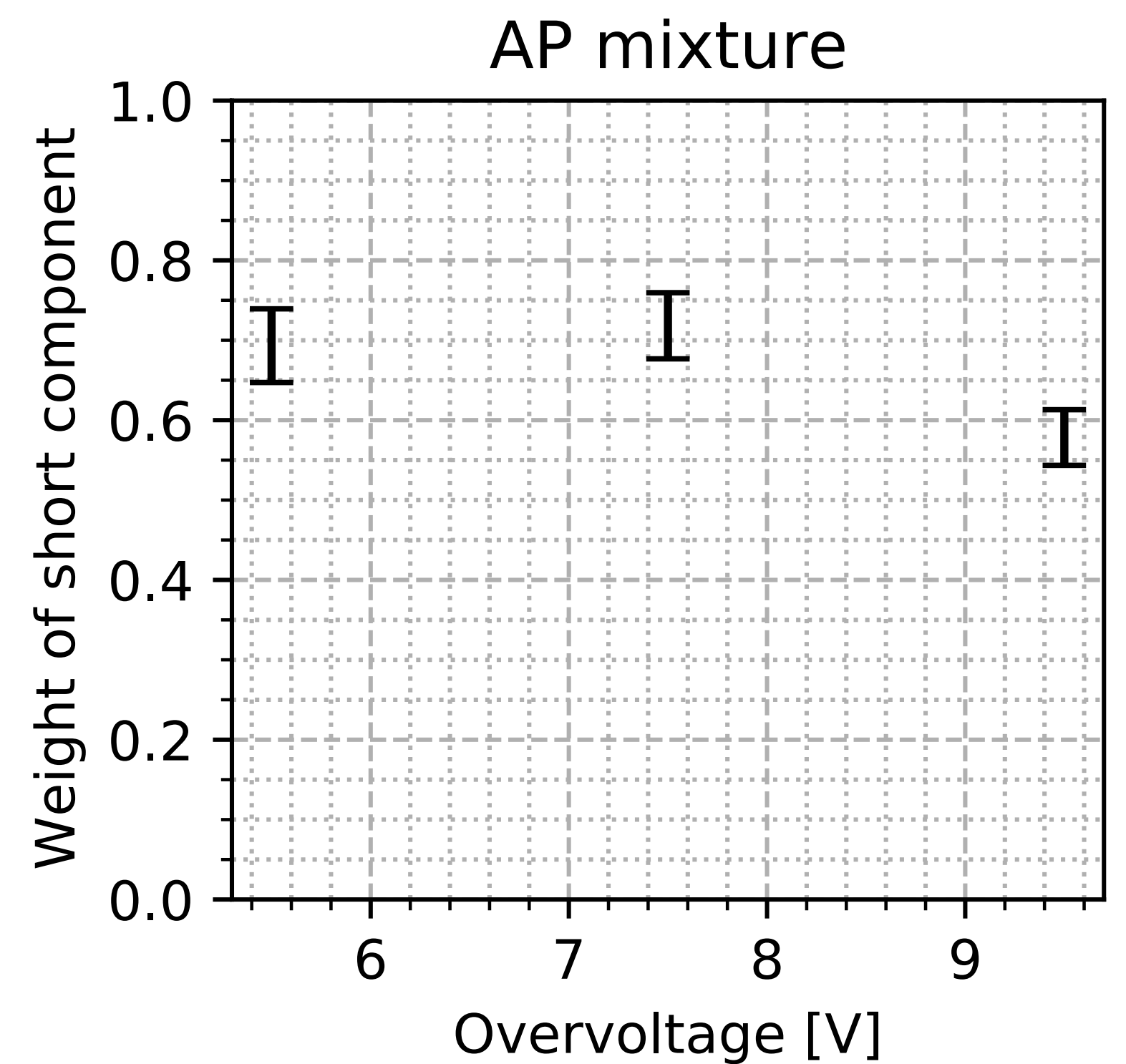
$P(\text{AP})$



$\tau_1, \tau_2$



$p_1$



# Conclusioni



# Effetto del rumore correlato

Quando ci sono fotoni isolati il rumore correlato non è un problema.

Però ci sono dei segnali nel rivelatore in cui un singolo fotorivelatore viene colpito da molti fotoni, in quel caso gli impulsi si accavallano. Questo crea due problemi:

1. Non si possono identificare gli afterpulse
2. Il DiCT fa aumentare l'intervallo dinamico, se ce n'è troppo il digitalizzatore satura.

In generale se ho un processo ricorsivo che genera in media  $m$  figli a ogni passaggio, la media del totale è  $1/(1 - m)$ , che diverge per  $m \rightarrow 1$ . Quindi il fotorivelatore va operato con un rumore correlato non troppo alto, pena non avere margine operativo.

# Conclusioni

1. Per il primo filtraggio, che va eseguito sull'FPGA delle schede digitalizzatrici in tempo reale, va bene la media mobile.
2. La risoluzione temporale richiesta dalle specifiche (10 ns) per la discriminazione ER/NR è raggiunta nel prototipo. Però a SNR più bassi diverge rapidamente, con forte dipendenza dallo spettro del rumore.
3. Ho testato accuratamente i modelli del rumore correlato. Ci sono alcune incongruenze tra modello e dati, però la precisione dovrebbe essere sufficiente per la simulazione di DarkSide, che potrebbe quindi adottarlo.

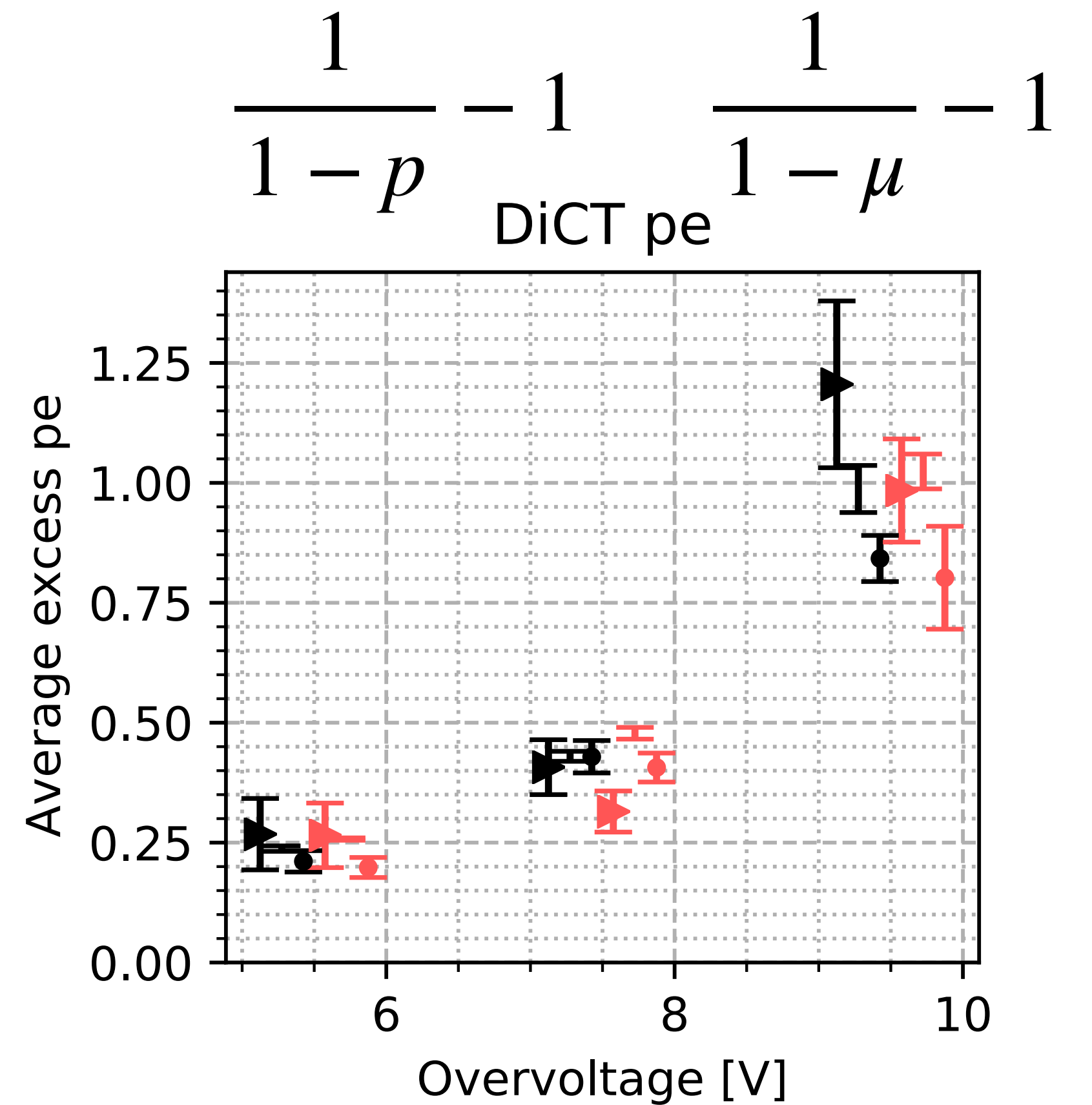
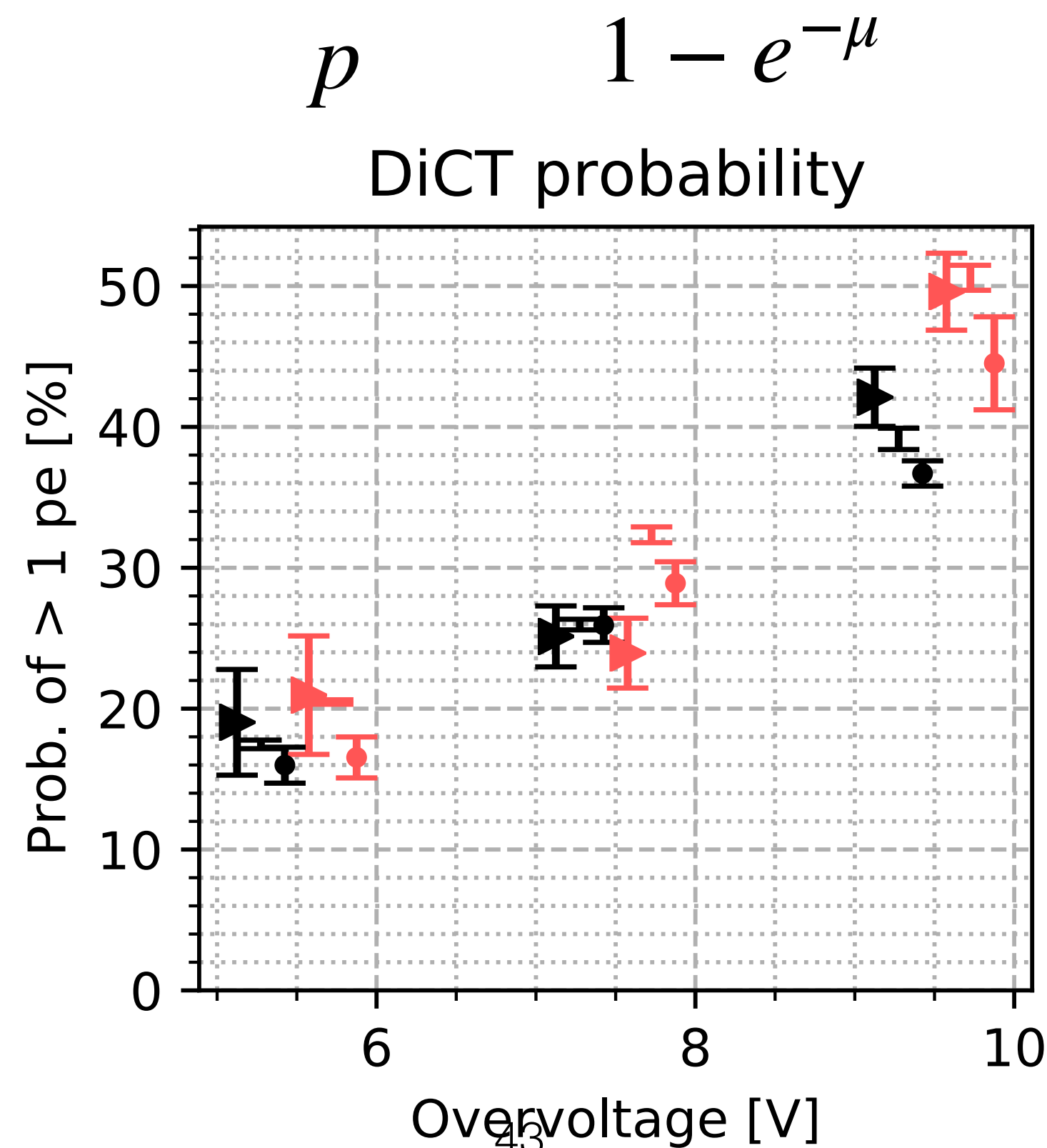
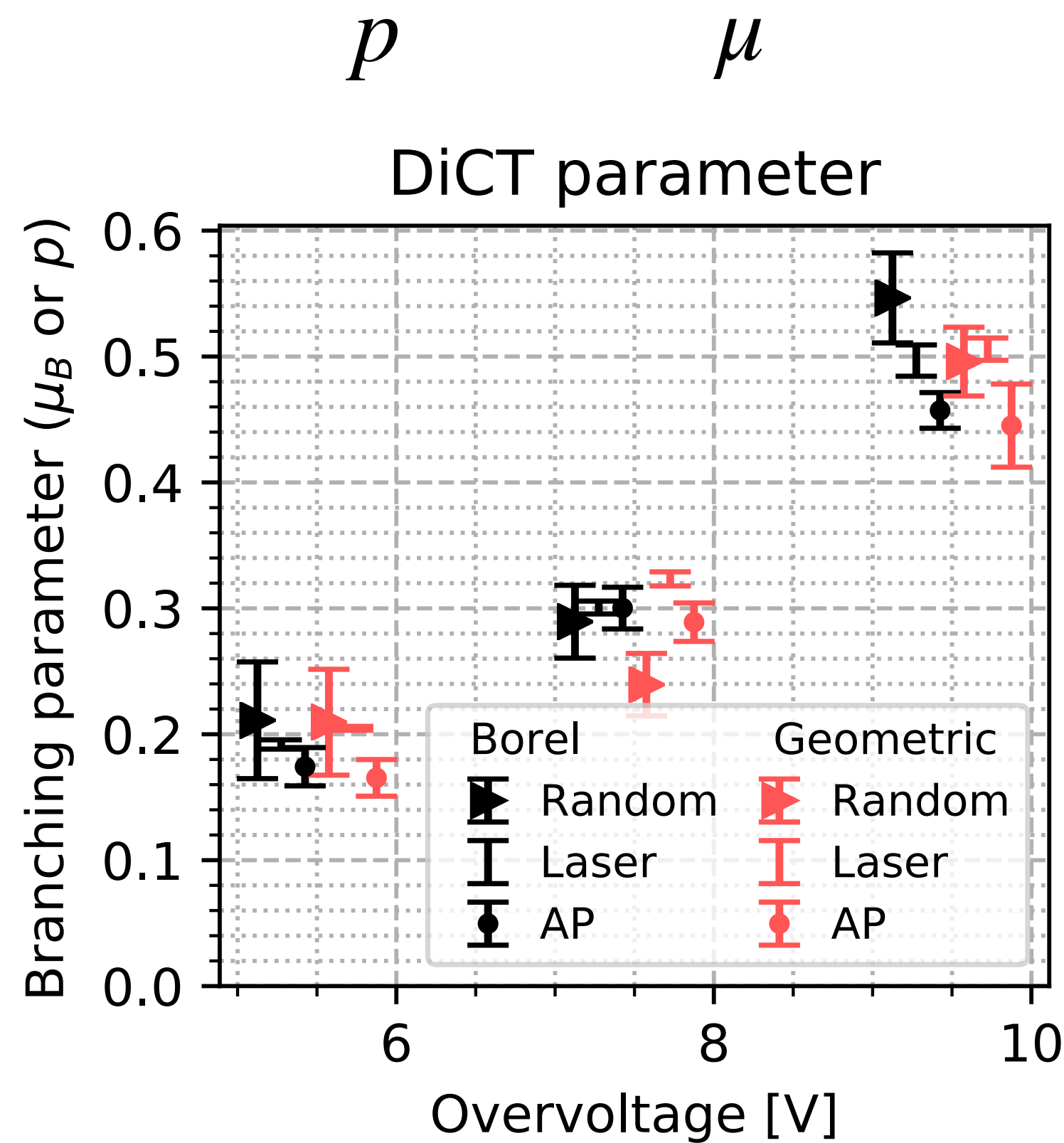
# Backup



# Risultati DiCT (2/2)

Mostro gli stessi risultati però uso i modelli per calcolare due quantità di interesse:

1. La probabilità complessiva di avere DiCT,
2. Il numero medio di DiCT prodotti.



# Perché le WIMP?

Gli esperimenti di rivelazione delle WIMP cominciano a diventare grandi e costosi. Vale la pena cercare le WIMP? Le stiamo cercando solo perché è fattibile e in realtà non ci aspettiamo che esistano, o è motivato?

La materia oscura potrebbe essere fatta di qualsiasi cosa. In questi casi si applica il rasoio di Occam. Quindi:

1. La materia oscura è fatta di particelle, e di una sola specie.
2. Il modello standard è una teoria efficace.
3. La nuova particella è il più possibile simile a qualcosa che c'è già.

=> WIMP.

