



SiPM kit Characterization

Stefano Carsi
Giulia Lezzani
Christian Petroselli
Giosuè Saibene

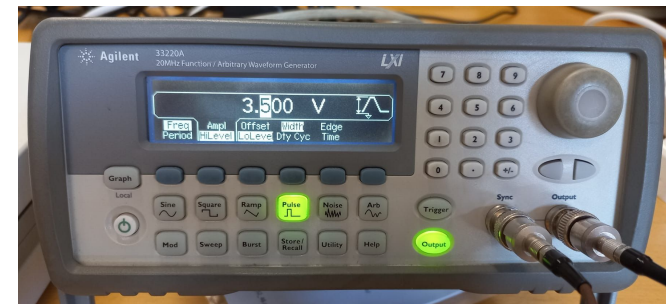
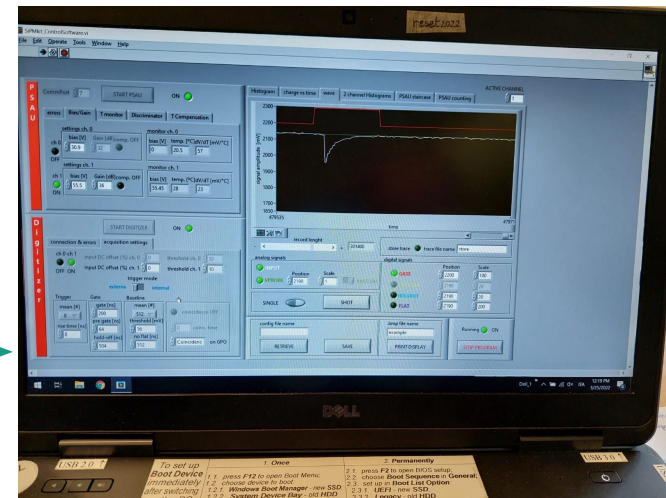
—
Prof. Massimo Caccia
Prof. Romualdo Santoro



Università degli Studi dell'Insubria
Dipartimento di Scienza ed Alta Tecnologia
Corso di laurea magistrale in Fisica

Strumenti utilizzati

- CAEN educational Kit
 - PSAU
 - Digitizer (che non abbiamo usato)
 - Sensore Hama S113360 - 1350 SiPM (area $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$; passo $50 \mu\text{m}$)
 - LED impulsato con lunghezza d'onda emessa nel picco di efficienza quantica del sensore
 - Fibra ottica per connettere il LED al sensore
- PC con software LabVIEW di acquisizione
- Oscilloscopio digitale
- Generatore di forme d'onda per pilotare un secondo LED



Caratterizzazione SiPM

- **Bias:** valore assoluto di alimentazione del SiPM
- **Breakdown voltage (BDV):** valore di bias al di sotto del quale le coppie prodotte non sviluppano le valanghe, ma vengono ricombinate
- **Over voltage:** differenza tra bias e breakdown voltage
- Dark Count Rate (**DCR**): rate di generazione di valanghe dovute a coppie prodotte per agitazione termica
- Probabilità di cross-talk (**CTP**): probabilità che una cella si accenda in seguito all'accensione di un'altra cella



Verifica della poissonianità del numero di conteggi

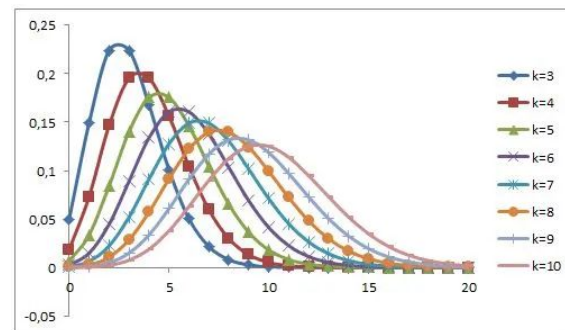
$$P_{\mu}(n) = e^{-\mu} \frac{\mu^n}{n!}$$

Probabilità poissoniana:

Probabilità di avere n conteggi con μ valor medio

Procedimento:

- **Acquisizioni singole** sull'oscilloscopio
- **Conteggio** del numero di picchi in 70 finestre di $50 \mu s$ ciascuna
- Trigger su LED (nonostante il sensore non sia illuminato)



Calcolo del μ ottimale e stima del DCR

- Scansione variando l'unico parametro μ a step di 0.05
- Calcolo del χ^2 ridotto rispetto all'istogramma di conteggio
- Errori poissoniani (radici del numero di conteggi)
- μ ottimale scelto come quello che minimizza il χ^2 ridotto

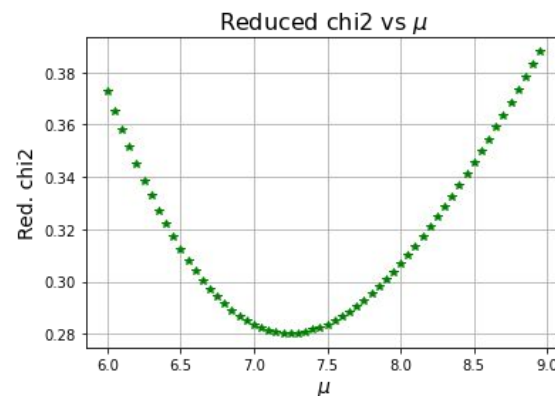
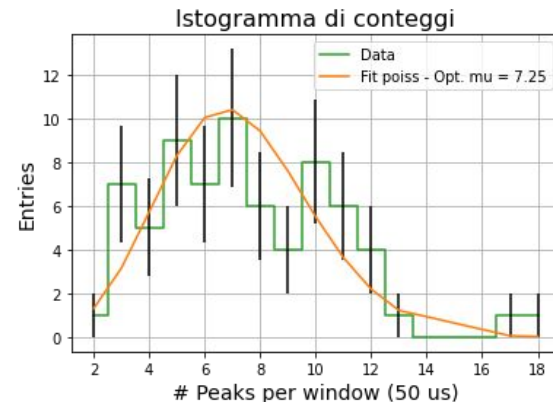


$$\mu = 7.25 \pm 0.05$$

$$\chi^2 / \text{dof} = 0.28$$



$$\text{DCR} = \mu / \Delta t = (145 \pm 1) \text{ kHz}$$



Distribuzione dei tempi di interarrivo e stima del DCR

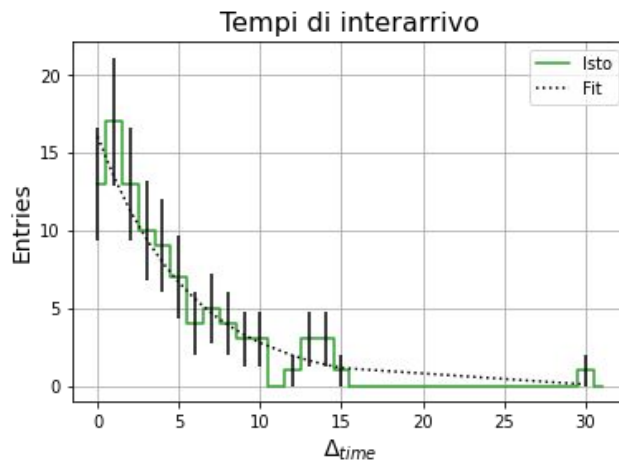
Procedimento

- Calcolo della **differenza di tempo** tra i picchi nelle prime 15 finestre
- Costruzione dell'istogramma, fittato con: $a \cdot e^{-x/\tau}$
- Errori poissoniani

Risultati

- $\chi^2 / dof = 0.17$
- $\tau_{\text{fit}} = (5.67 \pm 0.88) \text{ ns}$

DCR = $1 / \tau = (176.30 \pm 27.58) \text{ kHz}$

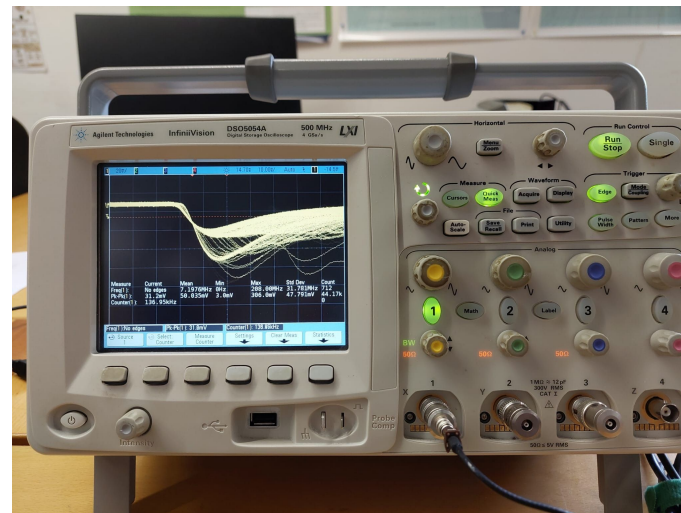


Stima del DCR dall'oscilloscopio

- 10 acquisizioni singole con oscilloscopio in modalità counting
- Trigger su segnale digitale
- Calcolo di media e std



$$\text{DCR}_{\text{osci}} = (150.34 \pm 1.63) \text{ kHz}$$



Test di compatibilità dei tre metodi

Stima del DCR con tre approcci:

- Numero di conteggi
- Tempi di interattivo
- Oscilloscopio

Costruzione della variabile
normalizzata z

$$Z = \frac{|x_1 - x_2|}{\sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}}$$

Conteggi vs Tempi	1.13
Oscilloscopio vs Tempi	0.94
Conteggi vs Oscilloscopio	2.79

Stima della probabilità di cross-talk

- Durante il conteggio del numero dei picchi è stato registrato il **numero di eventi** al di sopra della **soglia** di un fotoelettrodo
- 3 eventi registrati su 113 conteggi totali
- Errori stimati come le radici del numero di conteggi



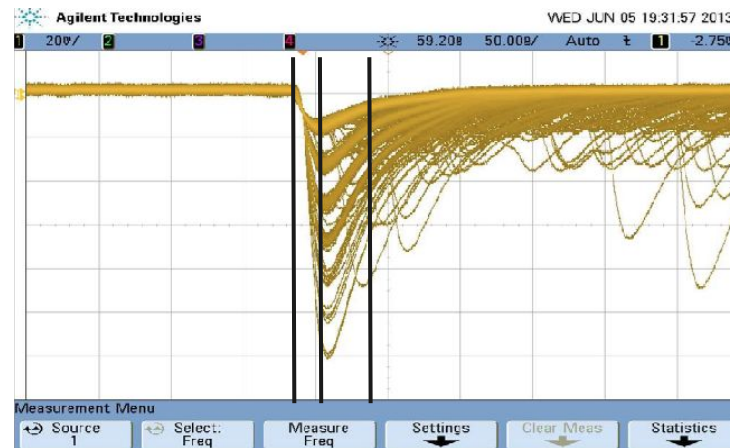
Probabilità di cross-talk $\rightarrow (2.65 \pm 1.55) \%$

Studio dello sviluppo temporale del segnale

- Per 6 segnali è stato posizionato un cursore prima all'**inizio** del segnale, poi in corrispondenza del **picco** e quindi uno a **1/e** del picco
- Calcolo delle **differenze temporali**
- Calcolo di media e std per ottenere i **parametri caratteristici dello sviluppo temporale** del segnale
- Verosimilmente, integrando p.es a **5 τ** , si sta considerando tutto il segnale

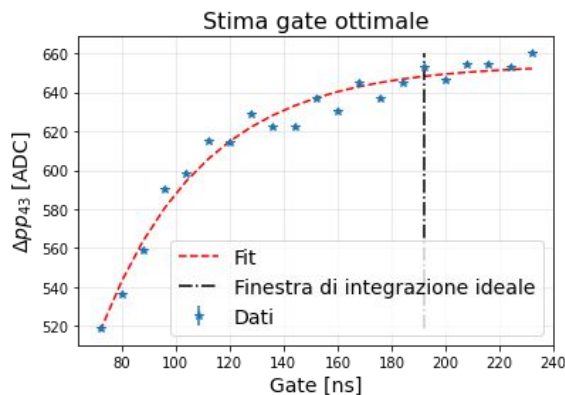
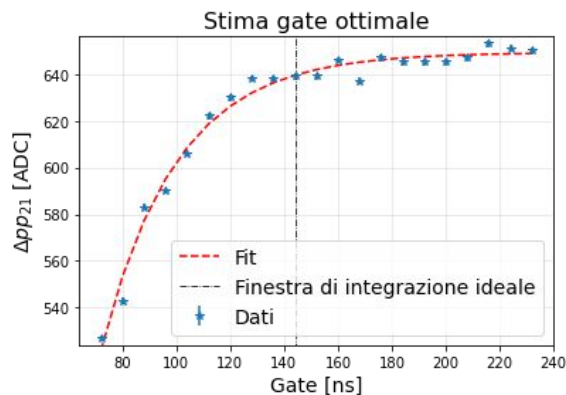
Risultati:

- $\Delta T_{\text{inizio-picco}} = (15.70 \pm 0.25) \text{ ns}$
- $\Delta T_{\text{picco-1/e picco}} = (34.10 \pm 1.67) \text{ ns}$



Stima del gate ottimale di integrazione (1)

- Acquisizione dei **multi photon spectra** con sensore illuminato al **variare del gate di integrazione**
- Misura **Δ peak-to-peak** per due coppie di picchi tramite **cursore**, sul software di acquisizione
- Errore sulla misura di singolo picco: 1 ADC
- Fit con: $a \left(1 - c \cdot e^{-x/\tau}\right)$



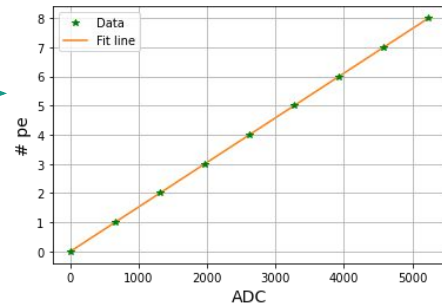
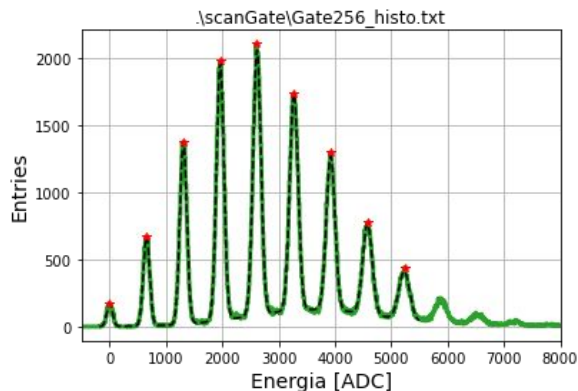
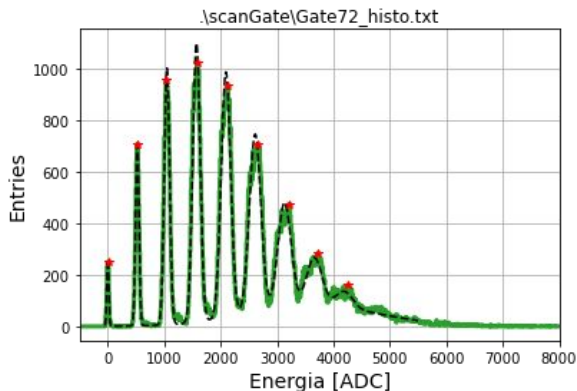
Risultati del fit:

$$\tau_{21} = (28.01 \pm 0.57) \text{ ns} - \chi^2 / \text{dof} = 0.78$$

$$\tau_{43} = (38.66 \pm 3.68) \text{ ns} - \chi^2 / \text{dof} = 1.08$$

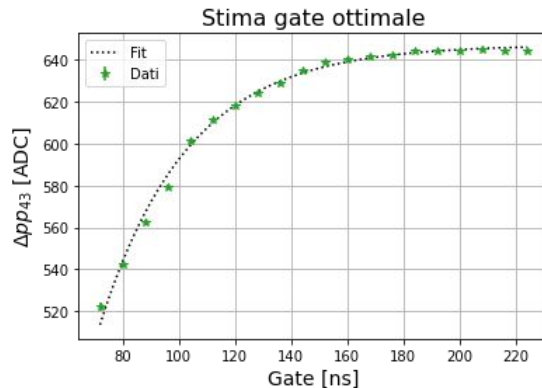
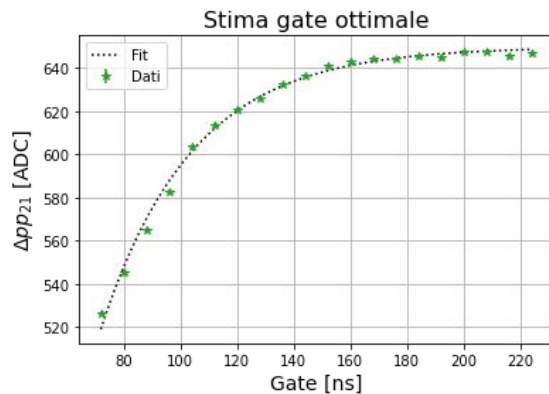
Stima del gate ottimale di integrazione (2)

- Acquisizione dei **multi photon spectra** con sensore illuminato al variare del **gate di integrazione**
- Fit di ciascuno **spettro** con somma di **10 gaussiane** + una **gaussiana** per modellizzare la **baseline**
- **Calibrazione** dello spettro in numero di fotoelettroni



Stima del gate ottimale di integrazione (3)

- Plot della Δ peak-to-peak in funzione del gate di integrazione per due coppie di picchi
- Fit con $a \left(1 - c \cdot e^{-x/\tau}\right)$
- Errori: estratti dal fit



Risultati del fit:

$$\tau_{21} = (32.33 \pm 0.44) \text{ ns} - \chi^2 / \text{dof} = 0.67$$

$$\tau_{43} = (31.38 \pm 0.41) \text{ ns} - \chi^2 / \text{dof} = 0.62$$

Compatibilità tra i τ

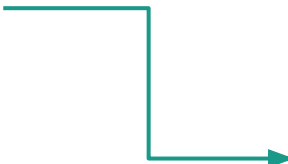
- τ calcolato sia con l'oscilloscopio che con le Δ peak-to-peak
- Costruzione della variabile normalizzata z

Δp_{21} vs Δp_{43}	1.59
Δp_{21} vs Oscilloscopio	1.02
Δp_{43} vs Oscilloscopio	1.58

Stima della probabilità di cross-talk

- Per ciascun picco, **calcolo dell'area** sommando il numero di conteggi a $\pm 3 \sigma$ rispetto al picco
- Calcolo di μ_0 come rapporto del numero di conteggi del picco a zero e numero totale di conteggi
- Calcolo di μ come valor medio dei dati
- Calcolo della **probabilità di cross-talk**

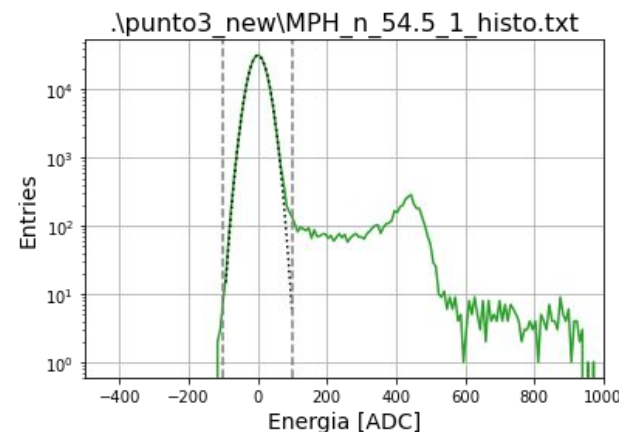
$$\mu = \frac{\sum_i x_i \cdot y_i}{\sum_i y_i} \quad \sigma = \frac{\sum_i y_i (x_i - \mu)^2}{\sum_i y_i}$$



$$\text{CTP} = (\mu - \mu_0) / \mu = (1.36 \pm 4.35)\%$$

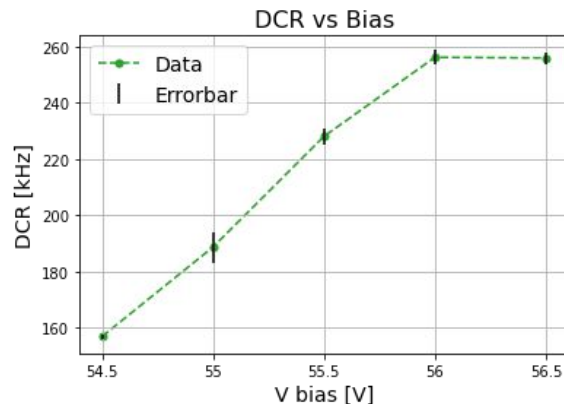
Multi photon spectra con sensore al buio

- Acquisizione dei **multi photon spectra** con sensore al buio al **variare del bias** (tre spettri per ciascun bias)
- Gate di integrazione 152 ns (valore più prossimo a 5τ , gate ottimale)
- Fit del picco a zero e calcolo del rispettivo **numero di conteggi** come **somma a $\pm 3\sigma$**
- Calcolo della **probabilità di avere 0 conteggi** come rapporto tra il numero di conteggi del picco a zero e numero totale di conteggi

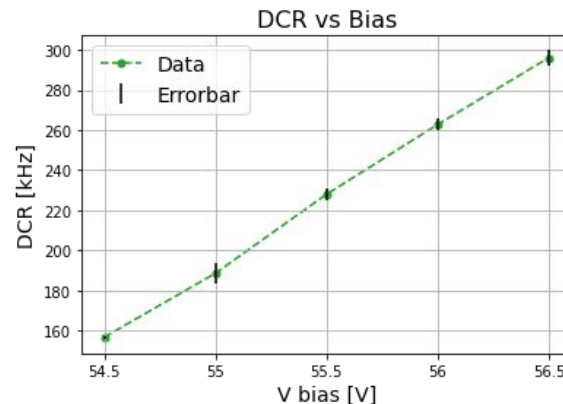


Stima del DCR

$$P(0) = e^{-\mu} = e^{-\text{DCR} \Delta t} \implies \text{DCR} = -\frac{\ln P(0)}{\Delta t}$$

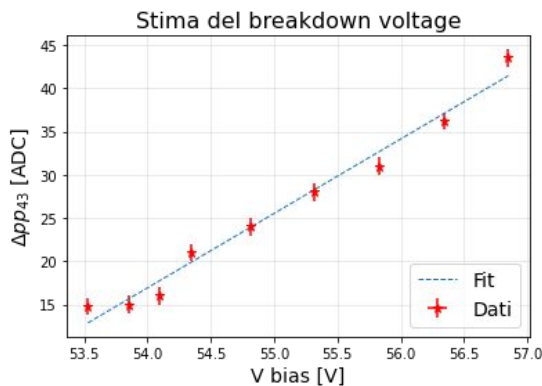
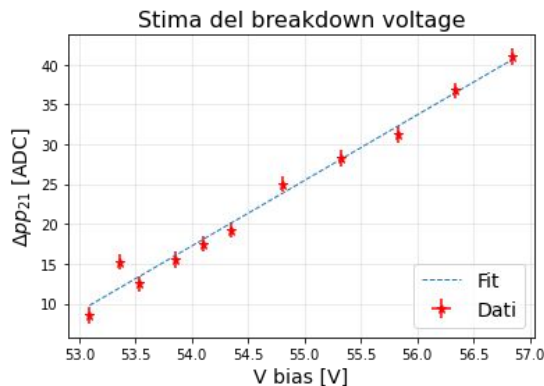
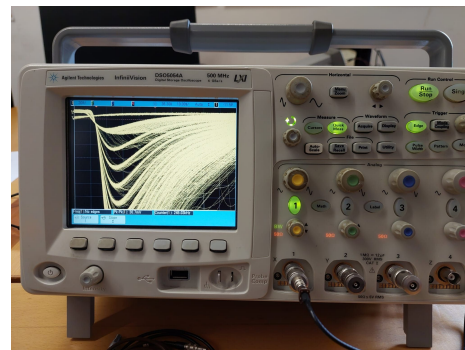


Problema! Non avevamo davvero cambiato il bias



Stima del breakdown voltage (1)

- Acquisizioni singole su oscilloscopio con sensore illuminato al variare del bias, triggerando sul LED
- Misura delle distanze tra due coppie di picchi consecutivi (2-1, 4-3) con cursore
- Errore su misura del singolo picco: metà della traccia sull'oscilloscopio ($\sim 2\text{mV}$)
- Fit lineare $m \times + q \rightarrow$ stima del Breakdown Voltage come $-q/m$
- Errore: propagazione con errori estratti dai fit



Risultati del fit:

$$\text{BDV}_{21} = (51.90 \pm 4.59) \text{ V} - \chi^2 / \text{dof} = 0.46$$

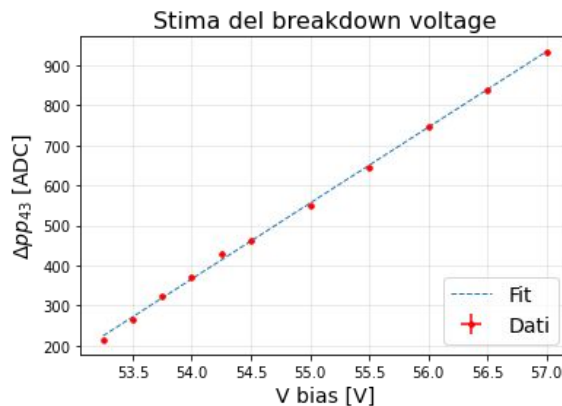
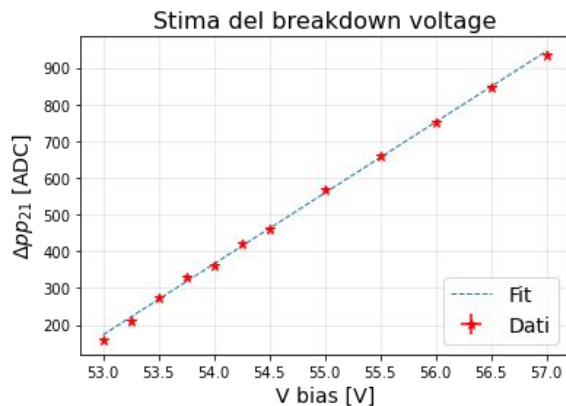
$$\text{BDV}_{43} = (52.03 \pm 5.36) \text{ V} - \chi^2 / \text{dof} = 0.57$$



$$\text{BDV} = (51.98 \pm 3.49) \text{ V}$$

Stima del breakdown voltage (2)

- Acquisizione dei multi photon spectra con sensore illuminato al variare del gate di integrazione
- Misura Δ peak-to-peak per due coppie di picchi tramite cursore, direttamente sul software di acquisizione
- Errori: propagazione degli errori. Errore sulla misura di singolo picco: 1 ADC
- Fit lineare $m x + q \rightarrow$ stima del Breakdown Voltage come $-q/m$
- Errore: propagazione con errori estratti dai fit



Risultati del fit:

$$\text{BDV}_{21} = (52.10 \pm 0.18) \text{ V} - \chi^2 / \text{dof} = 1.98$$

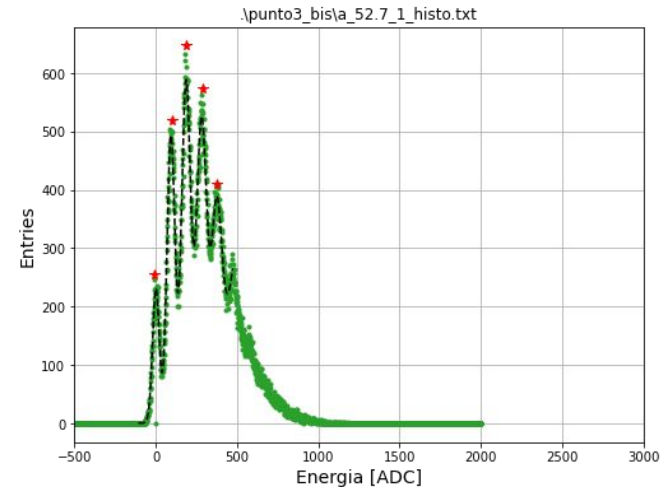
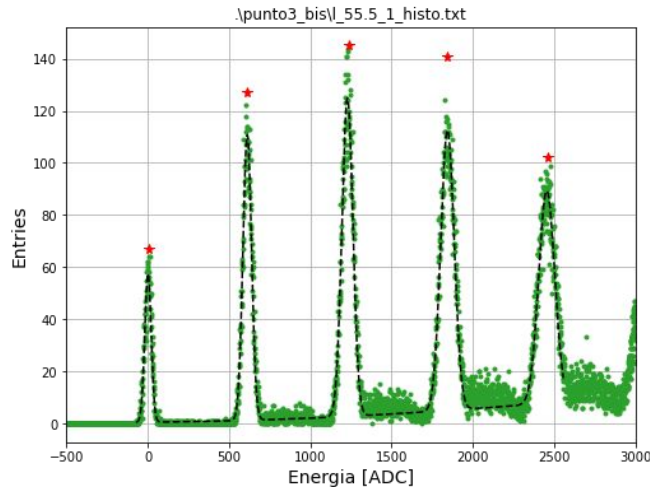
$$\text{BDV}_{43} = (52.06 \pm 0.20) \text{ V} - \chi^2 / \text{dof} = 1.58$$



$$\text{BDV} = (52.08 \pm 0.13) \text{ V}$$

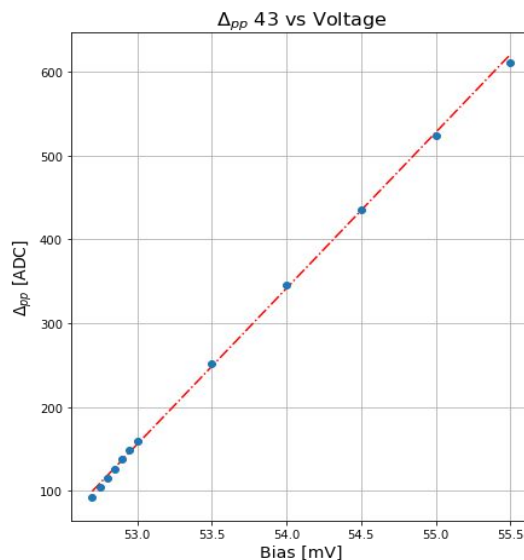
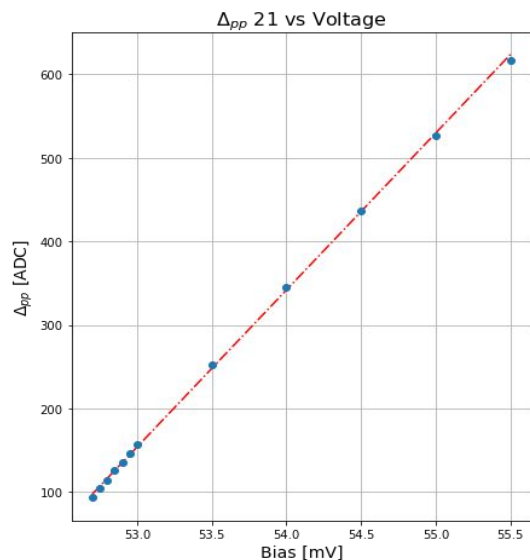
Stima del breakdown voltage (3)

- Acquisizione di 3 multi photon spectra con sensore illuminato per ogni valore del bias
- Fit di ciascuno spettro con somma di 5 gaussiane + una gaussiana per modellizzare la baseline
- Posizione del picco per ogni bias $\rightarrow$ media pesata dei valori medi estratti dai 3 fit



Stima del breakdown voltage (4)

- Plot della Δ peak-to-peak in funzione del bias per due coppie di picchi successivi (2-1, 4-3)
- Fit lineare $mx+q \rightarrow$ stima del Breakdown Voltage come $-q/m$
- Errori: estratti dal fit



Risultati del fit:

$$\text{BDV}_{21} = (52.17 \pm 0.05) \text{ V} - \chi^2 / \text{dof} = 0.84$$

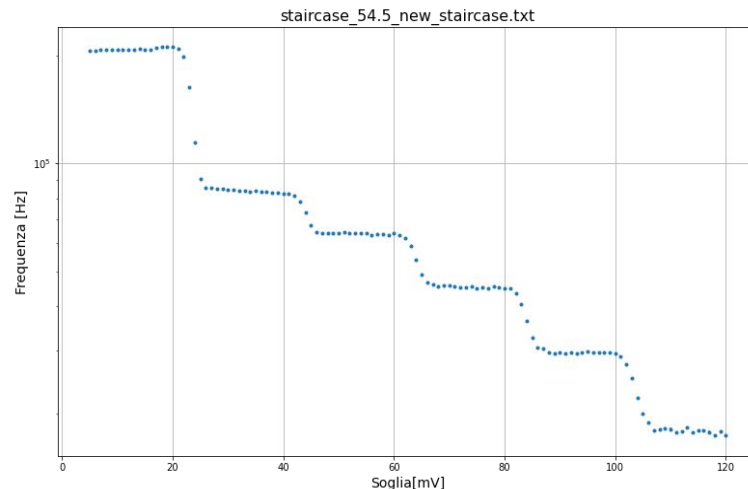
$$\text{BDV}_{43} = (52.16 \pm 0.05) \text{ V} - \chi^2 / \text{dof} = 1.10$$



$$\text{BDV} = (52.17 \pm 0.03) \text{ V}$$

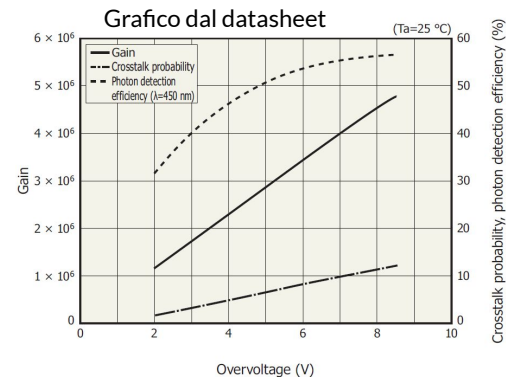
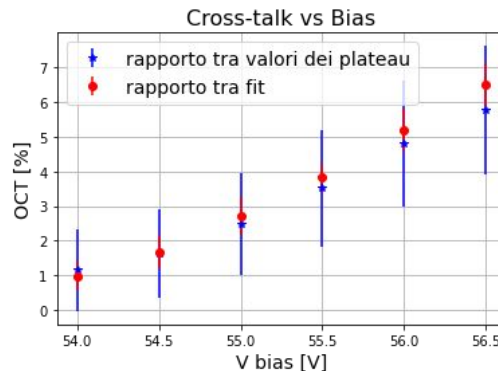
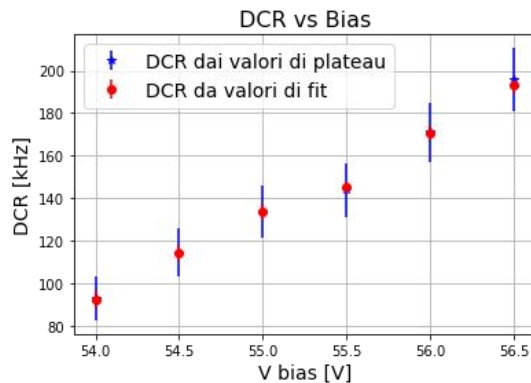
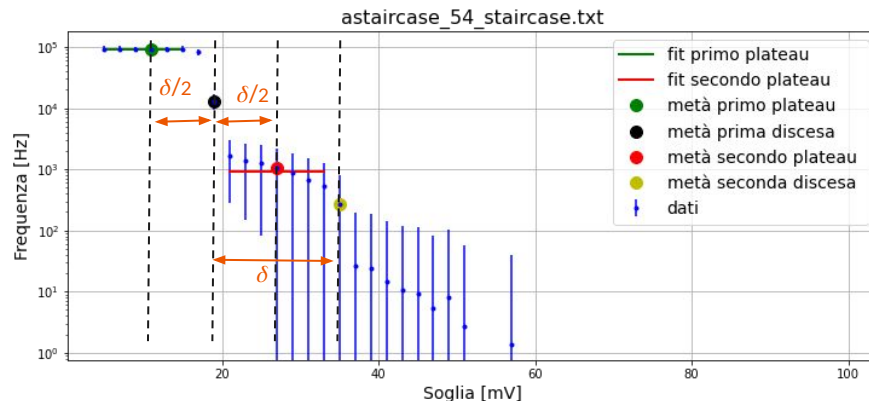
Analisi staircase (1)

- Frequenza degli eventi soprasoglia, al variare della soglia in mV
 - *Plateau* in corrispondenza della salita del segnale
 - Punto di flesso in corrispondenza della soglia a metà tra numeri di fotoelettroni successivi
- Obiettivi
 - Stima del **DCR** come frequenza di trigger alla soglia corrispondente a 0.5 pe
 - Stima della **probabilità di cross-talk** come il rapporto tra la frequenza alla soglia corrispondente a 1.5 pe e 0.5 pe



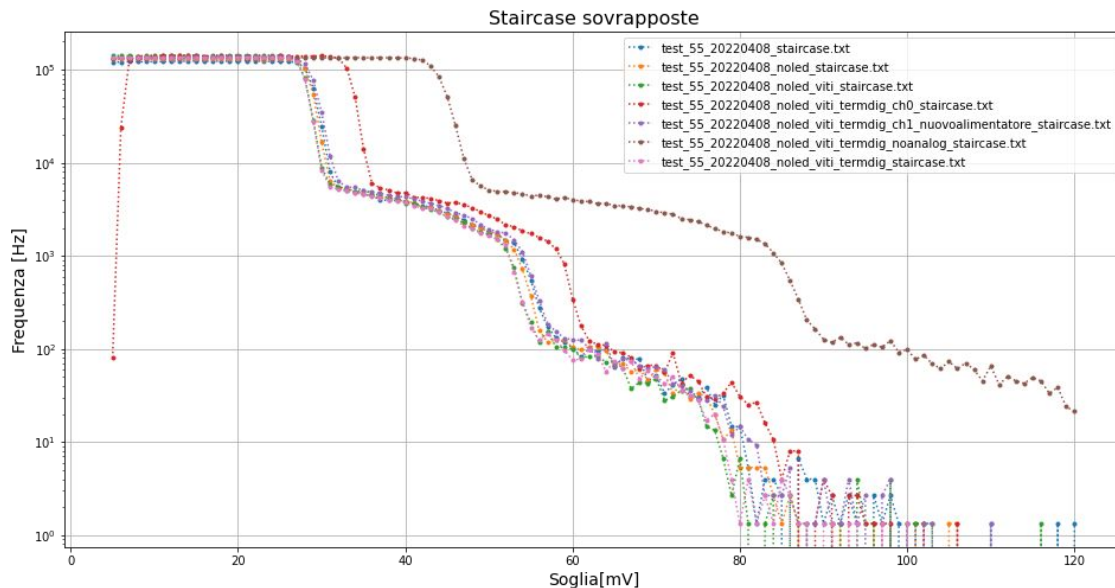
Analisi staircase (2)

- Acquisizione della staircase in funzione del bias
- Due metodi
 - Calcolo della distanza dei flessi
 - Fit costante nella zona di plateau



Variazioni sul setup

Test per valutare la presenza di sistematiche sulla misura della staircase



Alcune prove

- Rimozione fibra ottica
- Aggiunta di viti
- Terminazione del canale 0
- Terminazione del canale 0 e 1
- Cambio alimentatore
- Rimozione uscita analogica



Grazie dell'attenzione