

Caratterizzazione di Silicon Photo-Multiplier per l'Upgrade dei rivelatori RICH di LHCb



Simon Ghizzo - Università di Genova e INFN sezione di Genova
Incontri di Fisica delle Alte Energie 2025



High-Luminosity LHC e l'Upgrade II dei LHCb RICH

- Il programma High-Luminosity del Large Hadron Collider (LHC) porterà a LHCb una luminosità di $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, che corrisponde a ~ 40 interazioni per bunch-crossing. Per garantire un eccellente funzionamento del rivelatore in queste condizioni, l'Upgrade II avrà luogo durante il Long Shutdown 4 e sarà completato entro il 2035 [1]. Questo Upgrade, per i rivelatori Ring Imaging Cherenkov (RICH), richiederà:
 - Risoluzione angolare dei singoli fotoni Cherenkov inferiore a 0.5 mrad.
 - Occupanza al di sotto del 30% e aumento della granularità angolare.
 - Introduzione dell'informazione sul tempo di arrivo dei fotoni (risoluzione $< 100 \text{ ps}/\text{canale}$).
 - Redesign del layout ottico.
 - Sostituzione dei fotorivelatori attualmente utilizzati (MaPMT) e dell'elettronica di readout.
 - Un candidato sono i **Silicon Photo-Multiplier (SiPM)**.

Upgrade con i SiPM

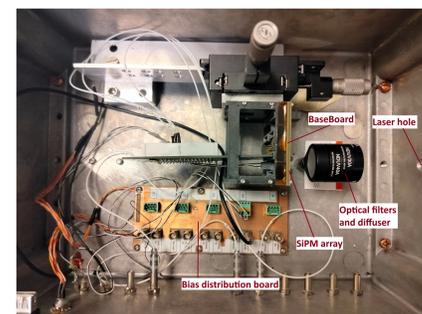
- Vantaggi dei SiPM:** dimensione dei pixel più piccola rispetto a quella dei MaPMT attualmente in uso ($3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$), ottima risoluzione temporale e maggiore efficienza di fotorivelazione.
- Alto Dark Count Rate (DCR):** i SiPM devono affrontare sfide significative a causa di un elevato DCR a temperatura ambiente, che aumenta ulteriormente con i danni da radiazione.
- Cooling:** può ridurre il DCR, che dipende dalla temperatura.
- Annealing:** può ridurre il DCR. Consiste nel riscaldare i SiPM per mitigare i danni al reticolo cristallino causati dalle radiazioni.
- Misura del tempo di arrivo dei fotoni:** L'introduzione di bin temporali, oltre a quelli spaziali dei pixel, contribuisce in modo significativo a sopprimere il contributo del DCR.

Misura della risoluzione temporale dei SiPM

Per caratterizzare la risoluzione temporale di un array SiPM, questo è stato illuminato con luce laser in una scatola sigillata. Vengono misurate le seguenti grandezze:

- Il tempo di arrivo (ToA) del segnale del SiPM, calcolato rispetto al trigger del laser.
- Il tempo sopra soglia (ToT) del SiPM rispetto alla soglia dello strumento utilizzato per la misura.

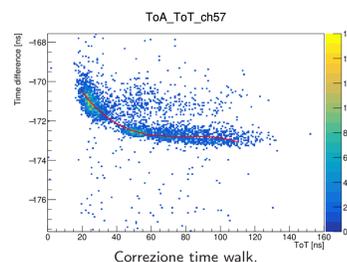
Viene eseguita una correzione di time walk sul grafico 2D ToA vs ToT, quindi viene selezionata la regione ToT corrispondente ai segnali a singolo fotone. Il picco della proiezione in ToA è fittato con una funzione gaussiana. I segnali di un MaPMT e di un generatore di forme d'onda sono utilizzati come riferimento per migliorare la robustezza del setup al rumore elettrico.



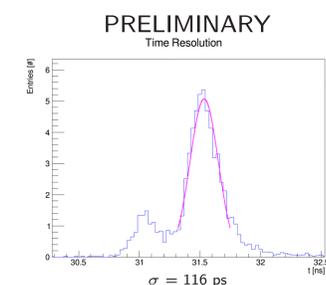
Setup per la caratterizzazione dei SiPM.



Array di SiPM su un PCB di alloggiamento.



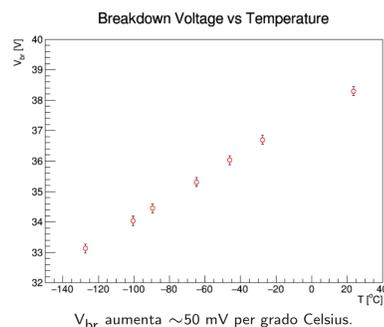
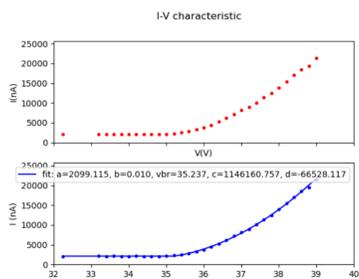
Correzione time walk.



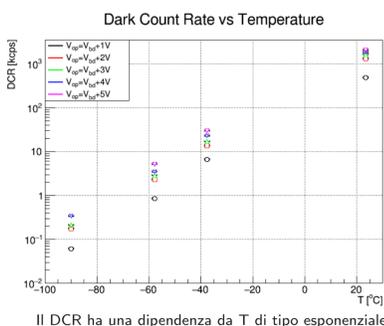
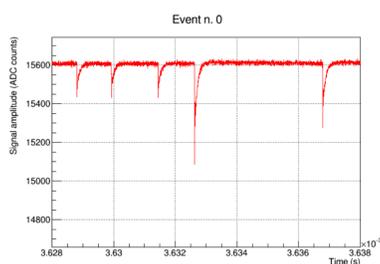
Caratterizzazione dei SiPM al variare della temperatura



- Caratterizzazione completa pre e post irraggiamento (e annealing) utilizzando un criostato con azoto liquido (da $+25^\circ\text{C}$ a $\sim -190^\circ\text{C}$) [4].
- Caratterizzazione di 75 SiPM di 5 modelli diversi.
- Tensione di breakdown (V_{br}) stimata con le curve I-V.
- Dark Count Rate (DCR) stimato dalle forme d'onda del segnale del SiPM.



V_{br} aumenta $\sim 50 \text{ mV}$ per grado Celsius.

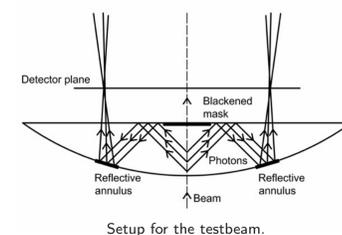


Il DCR ha una dipendenza da T di tipo esponenziale.

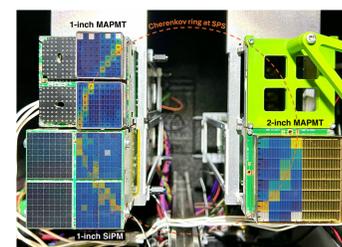
Valutazione della risoluzione temporale al TestBeam

MaPMT e SiPM testati su fascio a SPS al CERN con elettronica di readout FastIC [2]. Diverse tensioni operative e valori di soglia. Analisi dei dati SiPM:

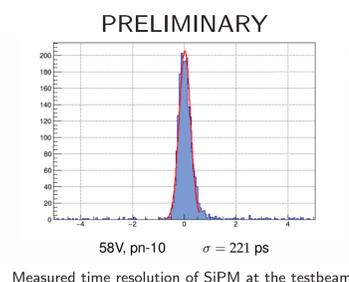
- Tempo di arrivo da segnale MCP di riferimento a valle della linea di fascio.
- Sono applicati un taglio in ToT e/o una correzione di time walk.
- La risoluzione temporale viene calcolata fittando il picco gaussiano nell'istogramma del tempo di arrivo.
- La risoluzione temporale stimata per diverse condizioni operative viene confrontata per trovare il miglior punto di lavoro.



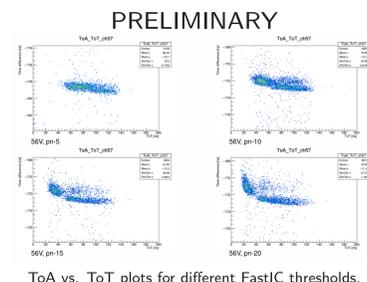
Setup for the testbeam.



The Cherenkov ring on the sensors used in the beam test.



Measured time resolution of SiPM at the testbeam.



ToA vs. ToT plots for different FastIC thresholds.

Referenze

- LHCb Collaboration. Framework tdr for the lhcb upgrade ii : Opportunities in flavour physics, and beyond, in the hl-lhc era. Technical report, CERN. 10.17181/CERN.NTVH.Q21W.
- LHCb RICH Collaboration. A novel fast-timing readout chain for lhcb rich ls3 and prototype beam tests. Technical report, CERN, 2023. 10.1016/j.nima.2023.168475.
- The DRD4 Collaboration. Proposal for a collaboration on the research and development for photon detectors and particle identification techniques (drd4). Technical report, CERN, January 2024. cds.cern.ch/record/2884872.
- Simon Ghizzo. Characterization of silicon photodetectors for future upgrades of particle identification cherenkov detectors in extreme irradiated environments at belle ii/lhcb experiments. Master's thesis, Genova University, October 2023. https://cds.cern.ch/record/2886277?ln=it.

Conclusioni

- I SiPM sono fotosensori molto promettenti per i rivelatori RICH della prossima generazione negli esperimenti ai collider.
- Un cooling molto inferiore a 0°C , unito ad annealing e shielding, è necessario in ambienti altamente irradiati e il suo effetto deve essere ben compreso.
- La risoluzione temporale è una delle caratteristiche più interessanti di SiPM da valutare per ottenere prestazioni migliori.
- Ulteriori test e R&D saranno condotti in stretta collaborazione con i produttori di SiPM per migliorarne le caratteristiche (anche nell'ambito della nuova collaborazione DRD4).[3]